

# 65米射电望远镜副面调整系统姿态精度监测与回零策略

窦玉超, 姚建涛, 侯雨雷, 段艳宾, 赵永生

(燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 上海天文台 65 米射电望远镜的副面调整机构为 Stewart 型并联机器人, 为了及时发现该并联机器人因机械磨损或误差累积造成的精度下降问题, 使用倾角传感器对并联机器人动平台姿态进行检测, 求得动平台姿态均方根误差并将其与设计指标进行比较, 从而用户可以判断是否需要进行维修或回零操作。为了提高并联机器人的易维护性, 设计了光电传感器回零和磁尺(磁致伸缩位移传感器)回零两种回零方式, 分析了两种回零方式以及通过回零操作对光电传感器和磁尺精度进行检测的原理。总结了该并联机器人需要进行回零操作的不同状况, 并给出了相应的回零控制策略。实验证明本文提出的回零控制策略是解决并联机器人回零问题的一种有效方法。

**关键词:** 65 米射电望远镜; Stewart 并联机器人; 精度; 倾角传感器; 回零

中图分类号: TP242.3, V9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2012)-04-0399-07

## Orientation Precision Monitoring and Homing Strategy of the Subreflector Adjusting System for 65 Meters Radio Telescope

DOU Yuchao, YAO Jiantao, HOU Yulei, DUAN Yanbin, ZHAO Yongsheng

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The subreflector's adjusting mechanism of the 65 meters radio telescope in Shanghai observatory is a Stewart parallel robot. In order to find out the problems of this robot's precision decline in time, caused by mechanical wear or error accumulation, inclinometers are used to measure the orientation of the mobile robot platform. Comparing the RMS (root mean square) error of the measured platform orientation with the expected orientation precision, thereby the user can judge whether maintenance or homing is required. For improving the easy maintenance of the parallel robot, two ways of homing are set up, by using photoelectric sensor and magnetic linearity displacement transducer (MLDT) respectively. The principles of the two ways of homing are analyzed, particularly that of calibrating the precision of the photoelectric sensor and the MLDT by using the homing operation. What's more, different conditions under which the parallel robot needs homing operation are summarized, and the corresponding homing control strategies are proposed. Test shows that the homing strategy proposed is an effective tool to solve homing problem of the parallel robot.

**Keywords:** 65 meters radio telescope; Stewart parallel robot; precision; inclinometer; homing

## 1 引言 (Introduction)

随着对并联机器人技术研究的深入, 并联机器人逐渐应用于多个领域。在国外, Taghirad<sup>[1]</sup>等将悬索驱动宏微并联机器人应用于加拿大下一代巨型射电望远镜。德国波鸿鲁尔大学天文研究所与卡尔蔡司光学公司合作设计制造了 Hexapod 望远镜<sup>[2]</sup>。在国内, 黄田<sup>[3]</sup>等开发了 Diamond 高速并联机械手, 并成功应用于工业生产。赵永生<sup>[4]</sup>等研制成功了具有自主知识产权的 5UPS/PRPU 并联数控机床。段宝岩<sup>[5]</sup>等在 1999 年研究了将并联机器人用于大型射电望远镜的问题。

上海天文台正在建造的 65 米射电望远镜, 副面直径 6.5 m, 质量约 1.6 t, 由 4 根与主反射面相连的桁架支撑, 距离主反射面中心 30 m。为补偿桁架重力变形引起的天线指向误差, 在副面与桁架之间装有 Stewart 型并联机器人, 通过对并联机器人动平台位姿的控制实现副面位姿的调整。但随着使用时间的推移, 机器人可能会发生因机械磨损或误差累积导致的精度下降问题, 为设备的安全运行埋下了隐患。为了提高该并联机器人的可靠性和易维护性, 有必要对并联机器人的精度监测以及应对不同状况的回零控制策略进行深入研究。并联机器人的

精度依赖于机构误差模型的精确建立, 刘红军<sup>[6]</sup>等以一种 4 自由度并联机器人为模型, 基于摄动法建立了运动学模型并分析了各种误差对动平台位姿的影响。针对并联机器人的回零问题, 刘含玮<sup>[7]</sup>等分析了一种 3 自由度柔索驱动并联机器人的误差来源, 建立了误差模型, 并通过实验验证了误差模型的正确性。高建设<sup>[8]</sup>基于栅格法提出了一种适用于 5UPS-PRPU 并联机床的两步回零法, 但该方法在回零过程中需要目测刀具是否接近零位姿, 否则需要手动单独调节各分支, 大大降低了设备的有效工作时间。Wang<sup>[9]</sup>等对 3 自由度冗余驱动并联机器人的回零控制策略进行了研究, 解决了冗余驱动并联机器人回零问题, 但是当回零传感器损坏后, 设备为了重新建立零点, 往往需要进行二次标定。Ding<sup>[10]</sup>等研究了平面 2 自由度并联机器人零点确定与校准的方法, 但该方法仅仅适用于平面并联机器人, 具有一定的局限性。Wang<sup>[11]</sup>等以 4RRR 平面并联机器人为模型, 提出了并联机器人安全回零概率的概念, 用以评估并联机器人在任意位姿下能否安全回零。

针对上述并联机器人精度监测和回零过程中存在的问题, 本文首先给出了使用倾角传感器测算动平台姿态的方法, 推导了姿态角均方根误差公式, 并给出了动平台姿态误差的判别标准。其次, 分析了并联机器人回零原理以及需要执行回零程序的状况, 并给出了相应的回零控制策略, 在一定程度上提高了射电望远镜的工作效率。

## 2 副面调整系统姿态精度监测 (Orientation precision monitoring of subreflector adjusting system)

### 2.1 副面调整机构构型介绍

作为副面调整机构的 Stewart 型并联机器人如图 1 所示。

该机器人由固定平台、运动平台以及连接固定平台与运动平台的 6 个驱动分支组成。每个驱动分支由 1 个胡克铰 (U 副)、1 个移动副 (P 副) 以及 1 个球铰 (S 副) 依次连接而成。其中胡克铰与固定平台相连, 球铰与运动平台相连, 采用移动副作为整个分支的驱动副。胡克铰  $B_i$  ( $i = 1, 2 \dots 6$ ) 共分 3 组均匀分布在半径为  $R = 1661 \text{ mm}$  的圆周上, 胡克铰每组之间夹角  $\phi_1 = 120^\circ$ , 每组内两胡克铰之间夹角  $\theta_1 = 10^\circ$ 。球铰  $b_i$  ( $i = 1, 2 \dots 6$ ) 共分 3 组均匀分布在半径为  $r = 1535 \text{ mm}$  的圆周上, 球铰每组之间夹角  $\phi_2 = 120^\circ$ , 每组内两球铰之间夹角  $\theta_2 = 10^\circ$ 。

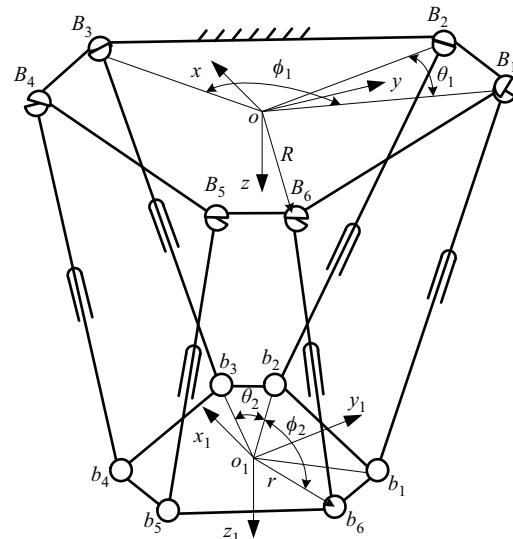


图 1 Stewart 并联机器人机构简图

Fig.1 Mechanism of the Stewart parallel robot

### 2.2 副面调整机构运动学反解

为了描述动平台相对固定平台的位姿, 分别在固定平台和动平台中心建立直角坐标系  $o\text{-}xyz$ 、 $o_1\text{-}x_1y_1z_1$ , 如图 1 所示, 坐标系  $o\text{-}xyz$  的  $x$  轴、 $y$  轴位于固定平台平面内,  $y$  轴与  $\angle B_1oB_2$  的角平分线重合。坐标系  $o_1\text{-}x_1y_1z_1$  的  $x_1$  轴、 $y_1$  轴位于动平台平面内,  $y_1$  轴与  $\angle b_1o_1b_2$  的角平分线重合。根据胡克铰在固定平台上的分布, 可计算出各胡克铰在坐标系  $o\text{-}xyz$  下的位置矢量为

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_1 &= R \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta_1}{2}\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta_1}{2}\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{B}_2 &= R \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_1}{2}\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_1}{2}\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{B}_3 &= R \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{5\theta_1}{2} + 2\phi_1\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{5\theta_1}{2} + 2\phi_1\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{B}_4 &= R \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\theta_1}{2} + 2\phi_1\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\theta_1}{2} + 2\phi_1\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{B}_5 &= R \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\theta_1}{2} + \phi_1\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\theta_1}{2} + \phi_1\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{B}_6 &= R \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta_1}{2} + \phi_1\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta_1}{2} + \phi_1\right) \quad 0 \right]^T\end{aligned}$$

同理, 根据球铰在动平台上的分布, 可计算出各球铰在动坐标系  $o_1\text{-}x_1y_1z_1$  下的位置矢量为

$$\begin{aligned}\mathbf{b}_1 &= r \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi_2}{2}\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi_2}{2}\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{b}_2 &= r \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi_2}{2}\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi_2}{2}\right) \quad 0 \right]^T\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{b}_3 &= r \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{5\phi_2}{2} + 2\theta_2\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{5\phi_2}{2} + 2\theta_2\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{b}_4 &= r \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\phi_2}{2} + 2\theta_2\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\phi_2}{2} + 2\theta_2\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{b}_5 &= r \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\phi_2}{2} + \theta_2\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\phi_2}{2} + \theta_2\right) \quad 0 \right]^T \\ \mathbf{b}_6 &= r \times \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi_2}{2} + \theta_2\right) \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\phi_2}{2} + \theta_2\right) \quad 0 \right]^T\end{aligned}$$

假设某时刻动平台坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  在固定平台坐标系  $o-xyz$  下的位姿为

$$\begin{bmatrix} {}^A P_x & {}^A P_y & {}^A P_z & \alpha & \beta & \gamma \end{bmatrix}$$

其中  ${}^A \mathbf{P} = [{}^A P_x \ {}^A P_y \ {}^A P_z]$  为动坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  中心在固定坐标系  $o-xyz$  下的位置矢量.

用 Z-Y-X 欧拉角表示坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  相对坐标系  $o-xyz$  的旋转变换关系:

$${}_{o_1}^o \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma - s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma - c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

其中 s 和 c 分别表示 sin 和 cos, 则动平台铰链点  $\mathbf{b}_i$  在固定坐标系  $o-xyz$  下的位置矢量可表示成

$$\mathbf{b}'_i = {}_{o_1}^o \mathbf{R} \mathbf{b}_i + {}^A \mathbf{P} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

根据已知胡克铰与球铰在固定坐标系  $o-xyz$  下的位置矢量, 可求得分支杆长度

$$l_i = |\mathbf{B}_i - \mathbf{b}'_i| = |\mathbf{B}_i - {}_{o_1}^o \mathbf{R} \mathbf{b}_i - {}^A \mathbf{P}| \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

### 2.3 副面调整系统姿态精度监测

射电望远镜的指向精度即姿态精度, 作为射电望远镜重要的设计指标之一, 直接影响射电望远镜的天线温度. 因此可以用姿态精度作为监测调整机构精度运行状态的依据.

副面调整机构设计姿态精度小于等于  $10''$ . 为了对调整机构的姿态精度进行监测, 在固定平台上安装倾角传感器 1, 该传感器的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴分别与坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴重合. 在动平台上安装倾角传感器 2, 该传感器的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴分别与坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  的  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$  轴重合, 大地坐标系为  $o_2-x_2y_2z_2$ . 在第  $i$  个数据采集周期  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), 倾角传感器 1 采集到固定平台相对大地坐标系姿态角为  $\alpha_{1i}$ 、 $\beta_{1i}$ 、 $\gamma_{1i}$ , 旋转矩阵为  ${}_{o_1}^o \mathbf{R}$ . 倾角传感器 2 采集到动平台相对大地坐标系姿态角为  $\alpha_{2i}$ 、 $\beta_{2i}$ 、 $\gamma_{2i}$ , 旋转矩阵为  ${}_{o_1}^o \mathbf{R}$ . 根据坐标系旋转矩阵变换关系<sup>[12]</sup>,

可知动坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  相对固定坐标系  $o-xyz$  的旋转变换矩阵

$${}_{o_1}^o \mathbf{R} = {}_{o_2}^o \mathbf{R}^{-1} \cdot {}_{o_1}^o \mathbf{R}$$

其中

$${}_{o_1}^o \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\alpha_{1i}c\beta_{1i} & c\alpha_{1i}s\beta_{1i}s\gamma_{1i} - s\alpha_{1i}c\gamma_{1i} & c\alpha_{1i}s\beta_{1i}c\gamma_{1i} - s\alpha_{1i}s\gamma_{1i} \\ s\alpha_{1i}c\beta_{1i} & s\alpha_{1i}s\beta_{1i}s\gamma_{1i} - c\alpha_{1i}c\gamma_{1i} & s\alpha_{1i}s\beta_{1i}c\gamma_{1i} - c\alpha_{1i}s\gamma_{1i} \\ -s\beta_{1i} & c\beta_{1i}s\gamma_{1i} & c\beta_{1i}c\gamma_{1i} \end{bmatrix}$$

$${}_{o_1}^o \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\alpha_{2i}c\beta_{2i} & c\alpha_{2i}s\beta_{2i}s\gamma_{2i} - s\alpha_{2i}c\gamma_{2i} & c\alpha_{2i}s\beta_{2i}c\gamma_{2i} - s\alpha_{2i}s\gamma_{2i} \\ s\alpha_{2i}c\beta_{2i} & s\alpha_{2i}s\beta_{2i}s\gamma_{2i} - c\alpha_{2i}c\gamma_{2i} & s\alpha_{2i}s\beta_{2i}c\gamma_{2i} - c\alpha_{2i}s\gamma_{2i} \\ -s\beta_{2i} & c\beta_{2i}s\gamma_{2i} & c\beta_{2i}c\gamma_{2i} \end{bmatrix}$$

设坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  相对坐标系  $o-xyz$  的姿态角为  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), 则相对旋转矩阵

$${}_{o_1}^o \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\alpha_i c\beta_i & c\alpha_i s\beta_i s\gamma_i - s\alpha_i c\gamma_i & c\alpha_i s\beta_i c\gamma_i - s\alpha_i s\gamma_i \\ s\alpha_i c\beta_i & s\alpha_i s\beta_i s\gamma_i - c\alpha_i c\gamma_i & s\alpha_i s\beta_i c\gamma_i - c\alpha_i s\gamma_i \\ -s\beta_i & c\beta_i s\gamma_i & c\beta_i c\gamma_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

令

$${}_{o_1}^o \mathbf{R}^{-1} \cdot {}_{o_1}^o \mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^i r_{11} & {}^i r_{12} & {}^i r_{13} \\ {}^i r_{21} & {}^i r_{22} & {}^i r_{23} \\ {}^i r_{31} & {}^i r_{32} & {}^i r_{33} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

从式(1)和(2)可以得出

$$\cos \beta_i = \pm \sqrt{{}^i r_{11}^2 + {}^i r_{21}^2} \quad (3)$$

根据设计指标  $-90^\circ < \beta < 90^\circ$ , 取式(3)中的

$$\cos \beta_i = \sqrt{{}^i r_{11}^2 + {}^i r_{21}^2} \quad (4)$$

从式(4)可以求得各个姿态角的表达式:

$$\begin{aligned}\alpha_i &= \text{atan2}({}^i r_{21}, {}^i r_{11}) \\ \beta_i &= \text{atan2}(-{}^i r_{31}, \sqrt{{}^i r_{11}^2 + {}^i r_{21}^2}) \\ \gamma_i &= \text{atan2}({}^i r_{32}, {}^i r_{33})\end{aligned}$$

设该周期期望姿态角为  $\alpha_{3i}$ 、 $\beta_{3i}$ 、 $\gamma_{3i}$ , 则姿态角误差为:  $\alpha_i - \alpha_{3i}$ 、 $\beta_i - \beta_{3i}$ 、 $\gamma_i - \gamma_{3i}$ , 取连续 10 个周期进行姿态角检测, 可知姿态角均方根误差  $\delta$  表达式为

$$\delta = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}{3}} \quad (5)$$

其中  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  分别为绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的均方根误差

$$\delta_1 = \sqrt{[(\alpha_i - \alpha_{3i})^2 + \dots + (\alpha_{(i+9)} - \alpha_{3(i+9)})^2]} \times \frac{1}{10} \quad (i = 1, 2, \dots, 10)$$

$$\delta_2 = \sqrt{[(\beta_i - \beta_{3i})^2 + \dots + (\beta_{i+9} - \beta_{3(i+9)})^2]} \times \frac{1}{10} \quad (i = 1, 2, \dots, 10)$$

$$\delta_3 = \sqrt{[(\gamma_i - \gamma_{3i})^2 + \dots + (\gamma_{i+9} - \gamma_{3(i+9)})^2]} \times \frac{1}{10} \quad (i = 1, 2, \dots, 10)$$

定义当  $\delta \geq 10'' \times 0.9$  ( $0.9$  定义为系统的误差系数) 时, 则认为调整机构误差接近最大允许误差边缘, 需要对设备进行维护或执行回零程序消除系统累积误差。采用均方根平均值法计算系统的姿态角误差, 排除了偶然事件造成姿态角误差超差, 可以准确地反映出调整机构的精度状况。

### 3 副面调整系统回零 (Homing of subreflector adjusting system)

#### 3.1 伺服系统介绍

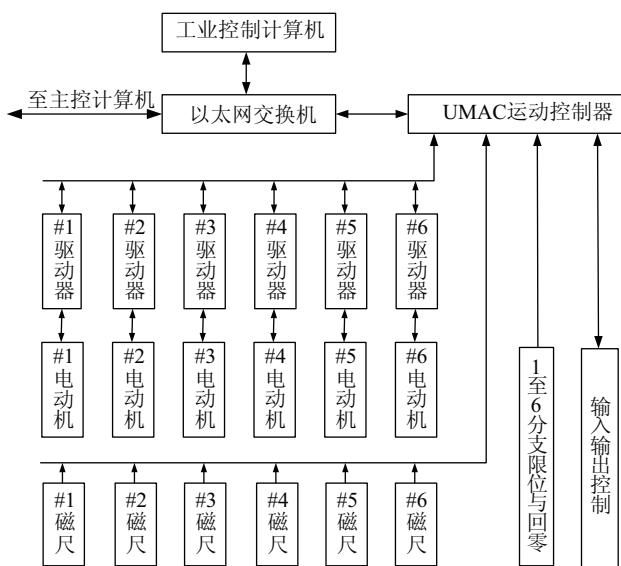


图 2 伺服系统结构图

Fig.2 Structure diagram of the servo system

控制系统结构如图 2 所示, 工业控制计算机负责接收主控计算机运动指令, 分析处理后生成各轴的运动指令发送给运动控制单元 UMAC (universal multi-axis controller), UMAC 作为一种多轴运动控制器, 负责协调各分支电机, 驱动副面按照期望的轨迹运动。为了消除丝杠以及减速器的反向间隙对运动精度的影响, 在每个分支上安装有绝对式磁尺 (MLDT); 同时, 在各分支上均装有光电传感器,

该传感器确定的零位参考点与磁尺上的零位参考点重合, 用以解决磁尺发生故障后设备的回零问题, 因此, 系统具有光电传感器回零和磁尺回零 2 种回零方式。输入输出模块负责采集系统中关键零部件的状态信息并对其进行调节, 以便控制系统工作在最佳状态。

#### 3.2 副面调整系统回零原理

##### 3.2.1 预回零位姿的概念

通常情况下, 并联机器人采用任意位姿下各分支同时回零的控制策略。由于各分支完成回零的时刻不一致, 导致动平台从任意位姿运动到零点位姿的过程中, 动平台位姿不受人为控制, 可能会发生位形奇异或分支干涉的现象。为了避免此类状况的发生, 本文提出了先控制动平台运动到预回零位姿再执行各分支同时回零的控制策略, 预回零位姿是指理论值为  $x = y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = h$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 0^\circ$  的位姿 ( $h$  由并联机器人处于初始位姿时动定平台之间的距离  $H$  确定, 一般取  $h = H \pm 100 \text{ mm}$ )。对于如何从当前位姿运动到预回零位姿有必要加以分析, 假设并联机器人需要回零时, 动平台位姿为

$$[x_1 \ y_1 \ z_1 \ \alpha_1 \ \beta_1 \ \gamma_1]$$

动平台的目标位姿为

$$[0 \ 0 \ h \ 0 \ 0 \ 0]$$

则从当前位姿运动到预回零位姿动平台的位姿变化量为

$$[x_1 \ y_1 \ z_1 - h \ \alpha_1 \ \beta_1 \ \gamma_1]$$

为了实现回零过程的可控性, 对动平台的运动轨迹进行规划, 将动平台位姿的变化量离散成  $n$  个位姿分步完成, 则动平台的第  $j$  个位姿为

$$\left[ \frac{x_1}{n} j \ \frac{y_1}{n} j \ \frac{z_1 - h}{n} j \ \frac{\alpha_1}{n} j \ \frac{\beta_1}{n} j \ \frac{\gamma_1}{n} j \right] \quad (j = n-1, \dots, 1, 0)$$

动平台处于第  $j$  个位姿时坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  相对坐标系  $o-xyz$  的旋转变换矩阵

$${}_{o_1}^o \mathbf{R}^j =$$

$$\begin{bmatrix} c\alpha'c\beta' & c\alpha's\beta's\gamma' - s\alpha'c\gamma' & c\alpha's\beta'c\gamma' - s\alpha's\gamma' \\ s\alpha'c\beta' & s\alpha's\beta's\gamma' - c\alpha'c\gamma' & s\alpha's\beta'c\gamma' - c\alpha's\gamma' \\ -s\beta' & c\beta's\gamma' & c\beta'c\gamma' \end{bmatrix}$$

其中  $\alpha' = \frac{\alpha_1}{n} j$ ,  $\beta' = \frac{\beta_1}{n} j$ ,  $\gamma' = \frac{\gamma_1}{n} j$ ,  $j = n-1, \dots, 1, 0$ .

动平台处于第  $j$  个位姿时坐标系  $o_1-x_1y_1z_1$  中心在坐标系  $o-xyz$  下的位置矢量为

$${}^A\mathbf{P}^j = [{}^A\mathbf{P}_x^j \ {}^A\mathbf{P}_y^j \ {}^A\mathbf{P}_z^j] \quad (j = n-1, \dots, 1, 0)$$

则可求得对应动平台的第  $j$  个位姿各分支杆长度

$$l_i^j = |\mathbf{B}_i^j - {}^j\mathbf{b}_i'| = |{}^j\mathbf{B}_i^j - {}_{o_1}^o\mathbf{R}^j\mathbf{b}_i - {}^A\mathbf{P}^j| \quad (j = n-1, \dots, 1, 0; i = 1, 2, \dots, 6)$$

通过运动控制器控制各分支按照上述杆长变化规律运动, 驱动动平台到达预回零位姿后, 即可执行磁尺回零或光电传感器回零。

### 3.2.2 磁尺回零原理

取并联机器人的一个分支为例, 其零位参考点设置如图 3(a) 所示, 在零位参考点左侧安装有光电传感器, 由该传感器确定的零位参考点和由磁尺确定的零位参考点重合, 光电传感器与零位参考点之间的距离称为回零偏移量。

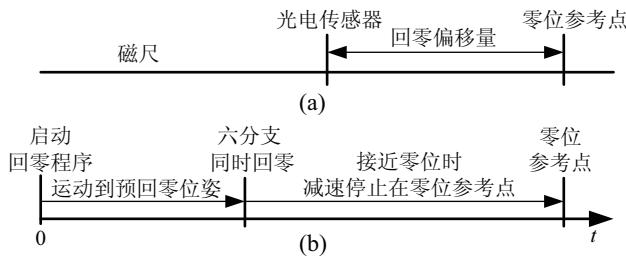


图 3 磁尺回零时序图

Fig.3 Diagram of MLDT homing sequence

磁尺回零时序如图 3(b) 所示, 当动平台到达预回零位姿后, 即可执行六分支同时回零, 电动机驱动各分支以相同的速度向各自零位参考点运动, 运动控制器 UMAC 实时监测杆长变化, 当分支长度接近磁尺的零位参考点杆长时, 运动控制器控制电机减速并准确停止在磁尺的零位参考点上, 回零完成。

### 3.2.3 光电传感器回零原理

UMAC 运动控制器具有高精度的运动回零硬件接口, 可接受外部传感器上升沿触发, 内部的硬件位置捕获功能可以记录下触发时刻位置信息, 由于延迟时间小于 100 ns, 可以忽略回零速度对定位精度的影响。

回零传感器采用 Baumer 公司的 FEG 14.24.35 型光电传感器, 其重复定位精度小于 0.01 mm, 响应时间小于 0.01 ms。因使用磁尺作位置环反馈时, UMAC 不支持外部传感器回零, 故当动平台到达预回零位姿后, 需将位置环地址设置为电机尾部旋转

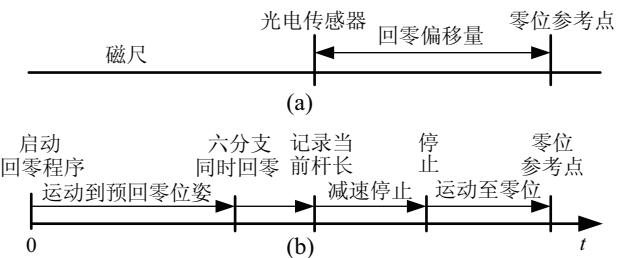


图 4 光电传感器回零时序图

Fig.4 Diagram of photoelectric sensor homing sequence

变压器指向的地址。如图 4(b) 所示, 在各分支同时回零的过程中运动控制器 UMAC 不断搜寻光电传感器信号, 当光电传感器触发后, 硬件位置捕获功能记录下触发时刻杆长并以设定的减速速度减速停止。停止后 UMAC 控制电机重新启动驱动分支杆运动到触发时刻记录点所确定的零位参考点, 将位置环数据地址更改回磁尺指向的地址, 回零完成。

### 3.2.4 光电传感器与磁尺精度检测原理

磁尺和光电传感器在提供 2 种不同回零方式的同时, 可以通过执行光电传感器回零对两种传感器的精度进行检测。执行光电传感器回零后, 假设此时实际杆长为  $\varepsilon_1$ , 理论杆长为  $\varepsilon_2$ , 设分支杆定位精度阈值为  $\varepsilon$ , 则当  $|\varepsilon_1 - \varepsilon_2| \geq \varepsilon$  时可以认为光电传感器或磁尺的固定件松动或因老化导致光电传感器或磁尺精度降低, 需要进行维护。该操作可以在设备运行前进行, 从而提前发现光电传感器或磁尺存在问题, 降低设备运行过程中发生故障的概率。

### 3.3 不同状况下的回零控制策略

为了缩短设备发生故障后的维护时间, 有必要对副面调整机构需要进行回零操作的状况以及相应控制策略进行分析总结。

#### (1) 动平台累积误差过大

由于并联机器人具有反解简单、正解困难的特点, 为了解决系统上电后需要重新计算动平台位姿带来的问题, 每次断电前系统自动记录当前动平台指令位姿, 并以此作为下次上电后动平台的实际位姿。然而由于指令位姿与实际位姿之间存在的误差会随着重新上电次数的增加不断累积, 当累积误差超出设计指标时, 则可以执行磁尺回零或光电传感器回零以消除动平台的累积误差。

#### (2) 磁尺发生故障需要更换

假设某分支上的磁尺发生故障需要更换, 通常情况下更换磁尺后需要对该分支进行二次标定, 以确定磁尺的零位参考点, 这极大地降低了系统的易维护性。由于本系统设计了 2 种回零方式, 可以使用光电传感器回零方式来确定磁尺的零位参考点,

避免了二次标定带来的问题，流程如图 5 所示。

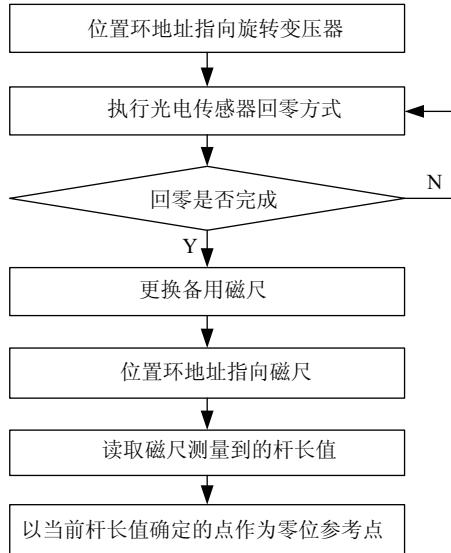


图 5 磁尺零点建立流程图

Fig.5 Flow chart of setting up MLDT zero point

### (3) 光电传感器发生故障需要更换

假设某分支上的光电传感器发生故障需要更换，如图 6 所示。

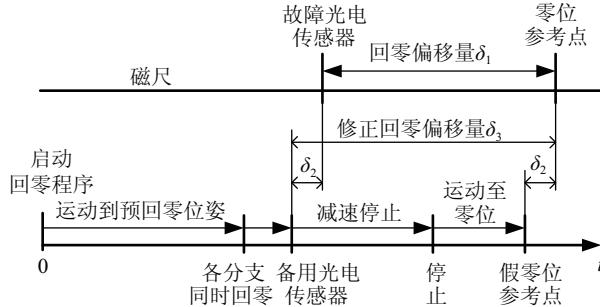


图 6 光电传感器安装误差示意图

Fig.6 Schematic of photoelectric sensor installation error

由于安装误差的存在，由备用光电传感器确定的零位参考点不再和磁尺所确定的零位参考点重合，故需要对回零偏移量重新计算，由备用光电传感器确定的零位参考点称为假零位参考点，与真实零位参考点之间的偏差记为零位偏差  $\delta_2$ ，为了补偿因为更换光电传感器导致的误差  $\delta_2$ ，需要计算修正后的回零偏移量  $\delta_3$ 。执行光电传感器回零后分支杆停止在假零位参考点，记录当前分支杆长值，将该杆长值与分支杆处于真实零位参考点时的杆长值相减可得零位偏差  $\delta_2$ ，从而可以确定修正后的回零偏移量应为  $\delta_3 = \delta_1 + \delta_2$ ，修改运动控制器中回零偏移量为  $\delta_3$ ，从而可以得到光电传感器确定的零位参考点，该参考点与磁尺确定的真实零位参考点重合。

## 4 实验 (Experiment)

为了验证回零控制策略的有效性，在本实验室

的 6PUS 并联实验平台<sup>[12]</sup> 上进行了模拟实验，如图 7 所示。

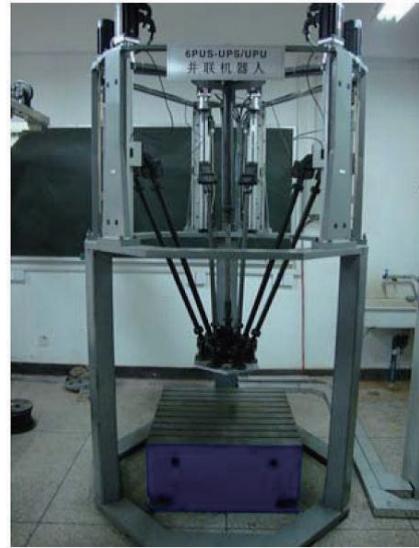


图 7 6PUS 并联实验平台

Fig.7 6PUS experimental platform

为了获得平稳有效的实验数据，对 2 种回零方式均进行了 10 次回零实验，求解了每种回零方式的均方根误差，以检验其回零精度是否满足设计的要求，如表 1、2 所示。

从实验结果可以看出，2 种回零方式的回零精度均满足本系统设计的定位精度小于 0.05 mm 的要求。二者相对回零误差为  $|\delta_3 - \delta_4| = 0.0009 \text{ mm} \ll 0.05 \text{ mm}$ ，故对于由两种传感器的回零误差  $\delta_3$ 、 $\delta_4$  造成的零点位置误差  $|\delta_3 - \delta_4|$ ，可以忽略其对系统零点精度的影响。因此为应对磁尺或光电传感器的故

表 1 光电传感器回零误差分析 (单位: mm)

Tab.1 Error analysis of homing using photoelectric sensors

(Unit: mm)

测量次数	理论零点	实际零点	回零误差	均方根误差 $\delta_3$
1	0	0.001	0.001	0.0013
2	0	0.000	0.000	
3	0	0.000	0.000	
4	0	-0.001	-0.001	
5	0	0.001	0.001	
6	0	-0.002	-0.002	
7	0	0.001	0.001	
8	0	-0.002	-0.002	
9	0	-0.001	-0.001	
10	0	-0.002	-0.002	

表 2 磁尺回零误差分析 (单位: mm)

Tab.2 Error analysis of homing using MLDT (Unit: mm)

测量次数	理论零点	实际零点	回零误差	均方根误差 $\delta_4$
1	0	0.004	0.004	0.0022
2	0	0.000	0.000	
3	0	0.002	0.002	
4	0	0.000	0.000	
5	0	-0.002	-0.002	
6	0	0.002	0.002	
7	0	-0.002	-0.002	
8	0	-0.004	-0.004	
9	0	0.001	0.001	
10	0	0.001	0.001	

障,本文提出系统的回零控制策略可以作为一种有效提高系统易维护性的手段加以采用.

## 5 结论 (Conclusion)

本文以作为射电望远镜副面调整机构的并联机器人为研究对象,首先在倾角传感器检测得到的固定平台和动平台相对大地姿态的基础上,推导了动平台在固定平台坐标系下的姿态表示,建立了副面指向精度误差公式,并给出了误差状态判别标准.其次为调整机构设计了两种回零方式并对回零原理进行了分析,总结了调整机构需要进行回零操作的状况并给出了相应的控制策略.通过实验证明了两种回零方式的有效性.本文推导的副面指向精度误差公式适用于副面可动型射电望远镜的精度监测,所提出的回零控制策略不但提高了调整机构的回零效率而且解决了位置传感器更换后需要对机构重新进行标定的难题,同时该方法对于解决其它以并联机构为模型的设备的回零问题也具有一定的参考价值.

## 参考文献 (References)

- |  |  |
|--|--|
| <p>[1] Taghirad H D, Nahon M A. Kinematic analysis of a macro-micro redundantly actuated parallel manipulator[J]. Advanced Robotics, 2008, 22(6/7): 657-687.</p> <p>[2] Koch P M, Kesteven M, Nishioka H, et al. The AMiBA hexapod telescope mount[J]. Astrophysical Journal, 2009, 649(2): 1670-1684.</p> <p>[3] 张明辉, 黄田. Diamond 机构的弹性动力学分析与试验研究 [J]. 机械设计, 2004, 24(11): 6-8.</p> | <p>Zhang M H, Huang T. Research on elastic dynamic analysis and test for Diamond mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2004, 24(11): 6-8.</p> <p>[4] 赵永生, 郑魁敬, 李秦川, 等. 5-UPS/PRPU 5 自由度并联机床运动学分析 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 12-16.</p> <p>Zhao Y S, Zheng K J, Li Q C, et al. Kinematic analysis of 5-UPS/PRPU 5-DOF parallel machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(2): 12-16.</p> <p>[5] Duan B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis[J]. Mechatronics, 1999, 9(1): 53-64.</p> <p>[6] 刘红军, 龚民, 赵明扬. 一种四自由度并联机构的误差分析及其标定补偿 [J]. 机器人, 2005, 27(1): 6-9.</p> <p>Liu H J, Gong M, Zhao M Y, et al. Error analysis and calibration of a 4-DOF parallel mechanism[J]. Robot, 2005, 27(1): 6-9.</p> <p>[7] 刘含玮, 王洪光, 李树军, 等. 一种 3 自由度并联柔索驱动机器人的精度研究 [J]. 机器人, 2008, 30(5): 392-397.</p> <p>Liu H W, Wang H G, Li S J, et al. On accuracy of a three DOF parallel wire driven robot[J]. Robot, 2008, 30(5): 392-397.</p> <p>[8] 高建设, 陶征, 程丽, 等. 新型五自由度并联机床回零研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(6): 41-44.</p> <p>Gao J S, Tao Z, Cheng L, et al. Homing research of a new type of 5-DOF parallel machine tool[J]. Machine Tool &amp; Hydraulics, 2009, 37(6): 41-44.</p> <p>[9] Wang J S, Wu J, Wang L P, et al. Homing strategy for a redundantly actuated parallel kinematic machine[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(4): 044501-1-5.</p> <p>[10] Ding Q Y, Sun L N, Ji J H, et al. Calibration of a 2-DOF planar parallel robot: Home position identification and experimental verification[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 510-515.</p> <p>[11] Wang L P, Liu D W, Li T M. Homing strategy for a 4RRR parallel kinematic machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(3): 399-405.</p> <p>[12] 贺静. 6PUS-UPS 控制系统开发与实验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.</p> <p>He J. Development of control system and experimental investigation for 6PUS-UPS parallel manipulator[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.</p> |
|--|--|

## 作者简介:

- 窦玉超 (1983-), 男, 博士生. 研究领域: 并联机器人, 伺服驱动技术.
- 姚建涛 (1980-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 并联机器人, 传感器技术.
- 侯雨雷 (1980-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 并联机器人, 传感器技术.