

文章编号 1004-924X(2009)01-0158-08

高精度大口径光栅拼接装置的控制算法

邵忠喜,张庆春,白清顺,富宏亚

(哈尔滨工业大学 机电学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:采用宏/微结合双驱动的少自由度并联进给结构,给出了一种光栅拼接装置设计算法。宏动部分是5PTS-1PPS型并联机构,采用步进电机驱动滚珠丝杠形式的进给机构;微动部分是5TSP-1PPS型并联机构,采用压电陶瓷驱动柔性铰链形式的进给机构;二者串联构成光栅拼接机构。计算了宏动部分和微动部分的并联机构自由度,利用并联机构运动学的逆解推导出该装置的控制算法,并根据控制算法进行了宏动、微动机构点位控制的运动学仿真。为了提高机构的定位精度,分析了机构的系统误差并提出了误差修正方法。最后,将以上算法应用到光栅拼接装置中。实验结果表明:宏动部分最大移动定位误差为 $3.6\ \mu\text{m}$,最大转动定位误差为 $4.4\ \mu\text{rad}$;微动部分最大移动定位误差为 $0.06\ \mu\text{m}$,最大转动定位误差为 $1.2\ \mu\text{rad}$;基本满足光栅拼接系统的精度要求。

关键词:光栅拼接;运动学逆解;并联机构;自由度分析

中图分类号:O436.1 **文献标识码:**A

Design method of controlling device for tiling high precision and large aperture grating

SHAO Zhong-xi, ZHANG Qing-chun, BAI Qing-shun, FU Hong-ya

(School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A mechanical grating tiling device is designed by a macro-micro dual-drive parallel mechanism with a few Degrees of Freedom(DOF). The raster matching device is composed of a macro-moving part using a step-motor controlled ballscrew unit(a 5PTS-1PPS parallel mechanism)and a micro-moving part using a piezoelectric ceramics controlled flexure hinge(a 5TSP-1PPS parallel mechanism) in series. The DOFs for the macro-moving part and the micro-moving part have been calculated and the control algorithms are deduced through inversing dynamics of parallel mechanism. Then, the point-point controls of the macro-moving part and the micro-moving part are simulated subsequently. In order to improve positioning precision of this mechanism, system errors have been analyzed and modified. Finally, above control algorithms are applied to the grating tiling device and experimental results indicate that the maximum linear location error is $3.6\ \mu\text{m}$ and the maximum rotation error is $4.4\ \mu\text{rad}$ for the macro-moving part; the $0.06\ \mu\text{m}$ and $1.2\ \mu\text{rad}$ for the micro-moving part, obtained da-

收稿日期:2008-03-14;修订日期:2008-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50705023)

ta can meet the precision requirement of grating tiling system.

Key words: grating tiling; inverse dynamics; parallel mechanism; Degree of Freedom(DOF) analysis

1 引言

光栅是拍瓦装置中破坏阈值最低的光学元件,为了提高驱动器的输出能量,需要宽度超过 0.5 m 的大尺寸高效衍射光栅。传统镀金光栅制作工艺成熟,口径可以做得较大,但破坏阈值很低。多层介质膜光栅的光学破坏阈值远高于金膜,但是制作工艺复杂,尺寸难于做大。利用拼接方法制作大口径的介质膜光栅具有两者的优点。拼接大面积衍射光栅是指把两块或几块衍射光栅放在一起,并使相互间的衍射波阵面的相位差足够小,相当于一块完整光栅的精度,可当作一块光栅使用^[1-2]。

为了适应光栅拼接任务的多运动自由度、结构复杂和高定位精度等要求,光栅拼接机构必须是高精度机构,这种机构应该无摩擦、无滞后,而且需要具有结构紧凑、重量轻、刚性大、稳定性好的特点。串联机器人由于各杆件依次相互联接,从而导致误差的累积和放大。尽管串联机器人也具有模块化性质,但很容易导致体积庞大,因此传统的串联机器人机构不适合作为光栅拼接机构;串联机器人不能用作光栅拼接机构的另一个原因是其刚度低。增加杆件的质量是提高串联机器人刚度的一个途径,但这同时也带来了另外的麻烦,也有人尝试从控制或局部支撑等角度来提高刚度,但这些方法同时也使控制变得复杂或者减少了光栅拼接机构的柔性^[3]。增加光栅拼接机构刚度的同时不增加质量的另一个方案是采用并联机器人机构。并联机构的动平台同时由多根杆支承,比串联的悬臂梁结构刚度大,提高了系统的承载能力,而且结构稳定;在位置求解上,串联机构正解容易,但逆解十分困难,而并联机构正解困难反解却非常容易,这就简化了机构的控制算法;由于并联机构的各个关节是并联形式,误差不容易累计和放大,利于提高系统的精度。并联机构的这种迅速、模块化、对称性、高精度、高刚度、高稳定性、运动杆件质量轻以及驱动装置安放在机架上等特性使其成为光栅拼接机构的优选方案^[4]。

为了满足动光栅的大行程、高精度、高稳定性

的要求,光栅拼接装置可设计成新颖的宏/微结合双驱动并联进给机构。该机构分为宏动和微动两个部分,宏动部分设计成 5PTS-1PPS 型并联机构,微动部分设计成 5TSP-1PPS 型并联机构,二者串联构成光栅拼接机构。就机构的每个传动链而言又属于宏/微结合驱动机构。本文就该光栅拼接装置的宏动与微动并联机构进行结构分析、运动学逆解分析和运动学仿真,计算了宏动部分和微动部分并联机构的自由度,并对该装置的控制算法、误差分析和误差修正算法做了详细阐述,通过拼接装置的实验研究,证明了该控制方法以及误差修正方法的可行性和实用性。本文还提出了静平台上的固定坐标系与动平台上的动坐标系在初始位置重合的坐标系建立方法,这种方法为解决该装置并联机构的运动学问题带来了方便。

2 光栅拼接装置介绍

如图 1 所示,高精度大口径光栅拼接装置由拼接机构和基准光栅(静光栅)两部分构成,拼接机构的作用是以静光栅为基准,在满足一定精度要求的前提下将动光栅与静光栅拼接为一个整体。其中静光栅直接竖直固定在基座上作为拼接基准,动光栅由拼接机构驱动进行五维调整。动光栅的五维调整机构(拼接结构)由五路宏/微结合驱动机构进行并联驱动及支撑,每一路都跨接在拼接基础框架和光栅调整架(用于安装动光栅)之间,按下述方式进行布置:沿 Z 轴方向平行布置三路,沿 X 轴方向平行布置两路,实现 ΔX , ΔZ , $\Delta\theta_x$, $\Delta\theta_y$, $\Delta\theta_z$ 五维调整及准确定位。在 Y 轴方向上采用钢球及平面组合(十字交叉型安装的直线导轨)进行动光栅的承重支撑和限位。每一路驱动机构由宏动和微动两部分构成,二者串联组成宏/微结合的驱动机构。宏动部分采用步进电机驱动滚珠丝杠结构,微动部分采用压电陶瓷驱动柔性铰链结构,二者之间由具有 5 个自由度的柔性连接轴连接。宏动定位机构实现动光栅的大范围、大行程粗定位,微动定位机构补偿系统的定位误差以实现动光栅的高精度定位,从而有效提高系统的分辨率和定位精度。

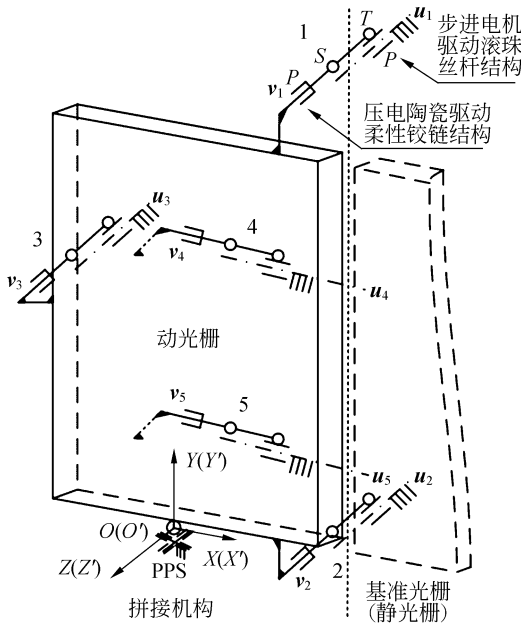


图 1 光栅拼接装置结构简图

Fig. 1 Structural sketch of grating tiling device

柔性连接轴在装置中起到连接、支撑和提供运动副的作用,它的设计首先要保证宏/微驱动时产生的力不会使动光栅变形超差。在这种要求下,柔性铰链的设计刚度必须远低于系统其他部位的刚度。柔性连接轴结构如图 2 所示,柔性连接轴由 2 个万向柔性铰链和中间的 2 个互相垂直的通槽(另一个未画出)组成,通槽承担轴向的旋转运动。通过以上分析,2 个万向柔性铰链可以分别认为是 3 自由度的球面副 S 和 2 自由度的万向铰链 T ,柔性连接轴是具有 5 个自由度的杆件。

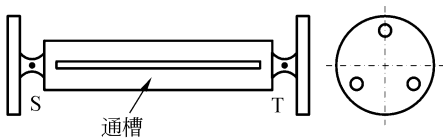


图 2 柔性连接轴

Fig. 2 Flexible shaft

锁紧机构采用简单的手动螺杆螺母锁紧结构。当需要进行装置的宏/微切换时,手动将螺杆与螺母拧紧,从而将宏动部分的移动导轨上下两块托板固定,此时步进电机驱动滚珠丝杠结构将被锁死,宏动工作无效。

这里需要说明的是坐标系 $OXYZ$ 建立在动光栅下方支撑钢球的中心,如图 1 所示。这种坐

标系的建立方法是由动光栅缺少 Y 轴方向的移动自由度这个特点决定的,同时也给该装置并联机构的运动学分析带来了方便。

宏动步进电机驱动滚珠丝杠结构属于移动副,所以图 1 中 $u_1 \sim u_5$ 既是滚珠丝杠的轴线,也是移动副的运动轴线,且固定在基座上; $v_1 \sim v_5$ 是压电陶瓷驱动柔性铰链结构的中心轴线,且固定在动光栅调整架上,其运动副类型为移动副。

3 光栅拼接装置的结构分析

传统的并联机构(例如 Stewart 平台)由动、静平台之间的 6 组点到点之间的距离约束构成,从这一基本原理出发,以点、线、面 3 种几何元素,以及 2 种约束(即角度约束和距离约束)为基础,来构造新型的并联机构^[5]。用这种新思路分析光栅拼接装置的并联机构可知:该机构实质是把并联机构中控制两点间距离的运动链改变为控制点到直线间距离的运动链,用来实现动光栅的位置和姿态的调节,这种并联机构具有结构新颖、正解简单、驱动位置选择灵活、控制容易等特点。

光栅拼接装置的并联机构与传统的并联机构有如下不同点^[6-9]:

(1) 传统的并联机构由动静平台之间的 6 组点到点之间的距离约束构成;光栅拼接装置的并联机构是控制点到直线间距离约束构成。

(2) 传统的并联机构的动静平台分开,在静平台上建立的固定坐标系与在动平台上建立的动坐标系分开;光栅拼接装置并联机构的动静平台在初始位置处重合,同时为了使并联机构位置逆解计算简单,在初始位置处固定坐标系与动坐标系重合。

(3) 在实际工程中,大部分是应用某种并联机构或者并联与串联的混合机构;光栅拼接装置由宏动部分的 5PTS-1PPS 型并联机构和微动部分的 5TSP-1PPS 型并联机构串联构成,该并联机构设计方案新颖,目前国内未见该设计方案应用于工程方面的报导。

3.1 宏动部分的结构分析

宏动部分的驱动源只是步进电机驱动滚珠丝杠机构,微动部分的压电陶瓷不参与驱动。如图 3 所示,除动光栅下方的运动链外,其余 5 条运动链都属于由移动副 P (步进电机驱动滚珠丝杠结

构)、万向铰链 T (柔性连接轴一端)、球面副 S (柔性连接轴另一端)组成的具有 6 个自由度的 PTS 运动链,移动副 P 的运动轴线固定在基座上。5 条 PTS 运动链在拼接机构中的布局如图 1 所示。

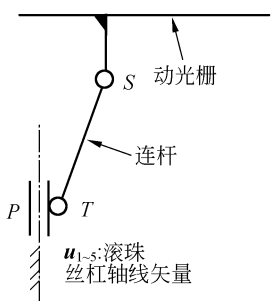


图 3 PTS 运动链

Fig. 3 PTS kinematic chain

动光栅和动光栅调整架的重量能够保证动光栅调整架始终压在支撑钢球上,限制了动光栅在 Y 轴方向的位移,同时钢球能够提供绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴 3 个方向的旋转,十字交叉型安装的直线导轨提供沿 X 轴、 Z 轴方向的移动,所以动光栅下方的运动链是由 2 个移动副 P 、1 个球面副 S 组成的具有 5 个自由度的运动链,该运动链的结构简图如图 4 所示。为了计算机机构自由度方便,在球面副与移动副之间增加了虚拟连杆。

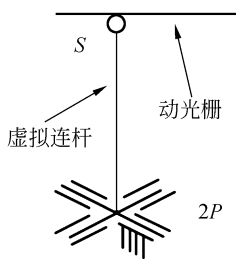


图 4 PPS 运动链

Fig. 4 PPS kinematic chain

具有被动链的少自由度并联机构的设计思想是:由 1 条被动链完全提供并联机构的约束,另外并联几条具有 6 个自由度的主动链,主动链的数目等于并联机构的自由度数。宏动部分并联机构的 PPS 运动链是被动链,其他 5 条 PTS 运动链是主动链,所以该并联机构的结构形式可以表示为 5-6-6-6-6 (被动链具有 5 个自由度,主动链具有 6 个自由度)。

通过以上分析,宏动部分属于 5PTS-1PPS 型

具有被动链的少自由度并联机构。

5PTS-1PPS 并联机构由 12 个连杆(6 根 T, S 之间真实存在的连杆和 6 根 P, T 之间虚拟的连杆)、1 个动平台、1 个静平台(虚拟平台)组成,所以机构的构件数 $n=14$ 。该机构中共有 6 个球面副(相对自由度 $\sum_{i=1}^6 f_i = 18$)、5 个万向铰链(相对自由度 $\sum_{i=7}^{11} f_i = 10$)、7 个移动副(相对自由度 $\sum_{i=12}^{18} f_i = 7$),总运动副数 $g = 18$,根据自由度的一般计算公式计算机机构的自由度为

$$F = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i = 5. \quad (1)$$

根据具有被动链的并联机构的设计思想也很容易计算出 5PTS-1PPS 并联机构的自由度等于主动链数 5。

3.2 微动部分的结构分析

微动部分的驱动源只是压电陶瓷驱动柔性铰链机构,步进电机驱动滚珠丝杠机构被固定并锁死。除动光栅下方的被动链外,其余 5 条运动链都属于由万向铰链 T (柔性连接轴一端)、球面副 S (柔性连接轴另一端)、移动副 P (压电陶瓷驱动柔性铰链结构)组成的具有 6 个自由度的 TSP 运动链(见图 5)。移动副 P 的运动轴线是压电陶瓷驱动柔性铰链结构的中心轴线,并且固定在动光栅调整架上。5 条 TSP 运动链在拼接机构中的布局如图 1 所示。

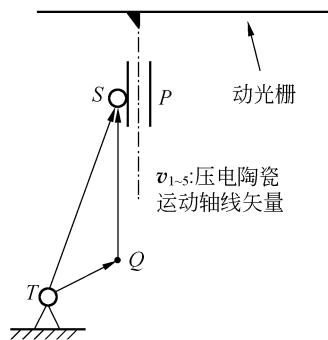


图 5 TSP 运动链

Fig. 5 TSP kinematic chain

同理宏动部分的结构分析思想,微动部分并联机构的结构形式也可以表示为 5-6-6-6-6,机构由动光栅下方的具有 5 个自由度的 PPS 被动链和 5 条具有 6 个自由度的 TSP 主动链组成,属

于 5TSP-1PPS 型具有被动链的少自由度并联机构。该机构自由度与宏动部分的并联机构自由度的计算方法相同,其自由度 $F=5$ 。

4 光栅拼接装置控制算法

为了解决已知动光栅在空间的位置和姿态数据求宏动进给机构或者微动进给机构输入位移的问题,需要研究光栅拼接装置的控制算法,即研究宏动并联机构和微动并联机构的位置逆向运动学问题。如图 1 所示,当运动轴线 $u_1 // u_2 // u_3 // v_1 // v_2 // v_3, u_4 // u_5 // v_4 // v_5$,且 $u_1 \perp u_4$ 时光栅拼接装置位于初始位置。为了使运动学逆解计算简单,在初始位置处将固定坐标系与动坐标系建立在动光栅支撑钢球的中心。这种坐标系建立的方法省去了固定坐标系与动坐标系之间的坐标变换,简化了计算。宏动(微动)并联机构的运动学逆解思想是:首先计算出动光栅调整后连杆(柔性连接轴,以下同理)铰点在固定坐标系下的绝对坐标值,然后在宏动(微动)近驱动机构位置连杆铰点的运动轴线上找到一点,使得该点到另一个连杆铰点的距离等于连杆的长度。

4.1 宏动部分的控制算法

由装置的结构设计可知 $u_1 // u_2 // u_3 // Z$ 轴, $u_4 // u_5 // X$ 轴。所以 u_1, u_2, u_3 的 X, Y 坐标值在固定坐标系下为定值, u_4, u_5 的 Y, Z 坐标值在固定坐标系下为定值。由几何关系得宏动并联机构的运动学逆解公式^[10]

$$\begin{cases} P_i = z_i' - \sqrt{l_i^2 - (x_i' - X_i)^2 - (y_i' - Y_i)^2} (i=1, 2, 3) \\ P_j = x_j' + \sqrt{l_j^2 - (y_j' - Y_j)^2 - (z_j' - Z_j)^2} (j=4, 5) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 为 1, 2, 3 运动链的位移输入; P_j 为 4, 5 运动链的位移输入; l_i, l_j 为连杆的长度; (x_i', y_i', z_i') 为动光栅调整后连杆铰点 S 在固定坐标系下的坐标; (X_i, Y_i, P_i) 为动光栅调整后 1, 2, 3 运动链中连杆铰点 T 在固定坐标系下的坐标; (P_j, Y_j, Z_j) 为动光栅调整后 4, 5 运动链中连杆铰点 T 在固定坐标系下的坐标。其中 (x_i', y_i', z_i') 按如下公式计算

$$[x_i', y_i', z_i', 1]^T = {}^O T [x_i, y_i, z_i, 1]^T (i=1 \sim 5), \quad (3)$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 为动光栅调整后连杆铰点 S 在

动坐标系下的坐标, ${}^O T$ 为动坐标系 O' 相对于固定坐标系 O 的齐次变换矩阵, 综合表示动光栅的平移变换和旋转变换。

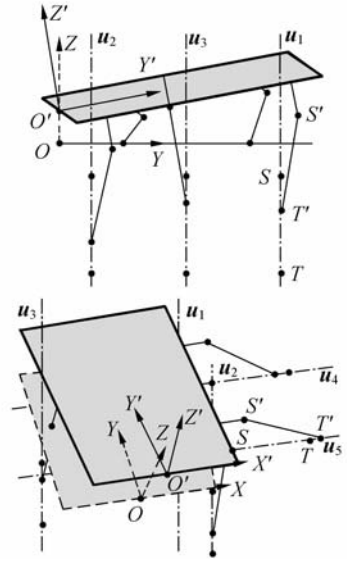


图 6 宏动并联机构的运动学仿真

Fig. 6 Kinematic simulation of macro parallel mechanism

根据以上宏动并联机构的运动学逆解结果对机构的点位控制进行运动学仿真^[11]。由于机构的微米、纳米和微弧量级的实际输入不利于仿真结果显示, 所以将机构实际输入值扩大 1 000 倍以便直观地看到仿真结果。进给机构的输入值如下:

$$\Delta X = \Delta Z = 20 \text{ mm},$$

$$\Delta \theta_x = \Delta \theta_y = \Delta \theta_z = \frac{\pi}{20} \text{ rad}.$$

如图 6 所示, 灰颜色平面表示动光栅, 运动链上的黑点表示铰链中心点, 点划线表示万向铰链 T 的运动轴线 $u_i (i=1 \sim 5)$, $OXYZ$ 是固定坐标系, $O'X'Y'Z'$ 是动坐标系, 坐标系原点位置的黑球表示支撑钢球。其中虚线部分是动光栅调整前的机构状态, 实线部分是动光栅调整后的机构状态, 在动光栅调整后运动链 1 的连杆铰点 S 运动到 S' , T 运动到 T' , 其他运动链同理。从固定坐标系的 X 轴正方向观察(如图 6 中上图), 动光栅没有产生 Y 轴方向的位移, 且连杆铰点 T 在运动轴线 $u_i (i=1 \sim 5)$ 上运动, 图 6 中下图可以观察到所有运动链在动光栅调整前后的状态。以上运动学仿真结果验证了运动学逆解结果的正确性。

4.2 微动部分的控制算法

如图 5 所示,在连杆铰点 S 的运动轴线上除铰点 S 点外任取一点 Q ,设铰点 S 的运动轴线单位矢量为 $\mathbf{V}_k(k=1\sim 5)$,则铰点 S 在固定坐标系下的坐标值按如下公式计算:

$$|\mathbf{TQ} + |\mathbf{QS}|\mathbf{V}_k| = l_k \quad (k=1\sim 5), \quad (4)$$

微动机构的输入

$$P_k = |\mathbf{QS}| - |\mathbf{QS}'| \quad (k=1\sim 5), \quad (5)$$

式中铰点 S' 是动光栅调整前铰点 S 的位置。

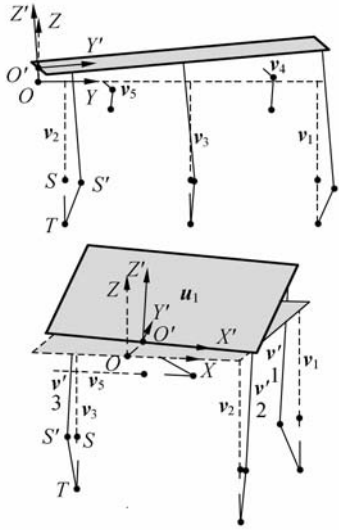


图 7 微动并联机构的运动学仿真

Fig. 7 Kinematic simulation of micro parallel mechanism

根据以上微动并联机构的运动学逆解结果进行机构点位控制的运动学仿真^[12]。如图 7,连杆铰点 T 固定,微动驱动机构的运动轴线 $v_1\sim v_5$ 固定在被控制平面上(动光栅),动光栅调整后运动轴线由 $v_1\sim v_5$ 分别运动到 $v'_1\sim v'_5$,图中其他未注解解释见 4.1 中对图 6 的解释。为了使仿真结果演示直观,将进给机构的输入值扩大倍数:

$$\Delta X = \Delta Z = 20 \text{ mm},$$

$$\Delta\theta_x = \Delta\theta_y = \Delta\theta_z = \frac{\pi}{40} \text{ rad}.$$

图 7 上图表示从固定坐标系的 X 轴正方向观察,动光栅在调整后没有产生 Y 轴方向的位移,且连杆铰点 S 在运动轴线 $v_i(i=1\sim 5)$ 上运动;图 7 下图直观显示了所有运动链在动光栅调整前后的状态。仿真结果验证了该运动学逆解结果的正确性。

5 系统误差分析及误差修正方法

为了提高光栅拼接系统的精度,必须分析系统误差,并对误差进行修正^[13]。

(1) 残差 由于宏动和微动驱动机构的最小进给位移的存在,使得每次进给距离的实际值与控制算法计算的理论值之间存在误差,即残差 e ($e_{\text{macro}} < 0.2 \mu\text{m}, e_{\text{micro}} < 1 \text{ nm}$)。为了提高动光栅的定位精度,采用累计残差的办法修正残差,即将动光栅每次调整后的残差在控制程序中累计,当 $\sum e_{\text{macro}} > 0.2 \mu\text{m}$ 或者 $\sum e_{\text{micro}} > 1 \text{ nm}$ 时,将宏动或者微动驱动位移值中增加 $0.2 \mu\text{m}$ (宏动)或者 1 nm (微动)。

(2) 宏/微结合误差 宏动步进电机运动结束后,为了保证微动部分运动可靠,需要将宏动步进电机锁死,即连杆铰点 T 固定。此时的宏动进给机构产生的残差称为宏/微结合误差,该误差可以通过微动机构补偿。具体的补偿方法:以实际宏动连杆铰链点 T 的坐标值和上位机控制程序中计算的动坐标系齐次变换矩阵为已知,按照微动并联机构逆解方法计算微动机构输入的位移值,该位移值就是宏/微结合误差通过微动机构的补偿值。

(3) 微动进给机构的输入输出误差 微动进给机构位移的输入值与输出值之间存在一个线性函数关系: $p_i' = ap_i + b(i=1\sim 5)$ 。函数中常量 a, b 值的精度直接影响到微动机构的定位精度。采用离线测量微动进给机构输入输出的实验方法,对测量数据运用最小二乘法求得 a, b 值。如图 8 所示某个微动进给机构的 18 组实验数据和

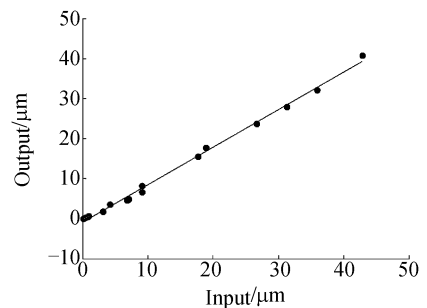


图 8 微动进给机构输入输出之间的线性函数关系
Fig. 8 Linear functional relationship between input and output of micro-moving mechanism

微动进给机构输入输出之间的线性函数: $p' = 0.9354p - 0.7657$ 。

(4)其他误差 丝杠螺距的累计误差、轴向间隙、丝杠机构的轴向刚度,还有温度变化引起的热变形,导向系统引起的运行姿态的变化等都会影响机构的定位精度。但有些误差因素可以忽略,有些误差修正系数必须经实验在线调整,由于检测设备精度的限制,在线调整误差修正系数的精度也会受到影响。

6 实验与结果

将以上分析的控制算法和误差修正方法运用到如图 9 所示的光栅拼接装置中进行实验,该装置五维调整的定位误差见表 1 的实验结果。在装置调试过程中,为了有利于程序运算和压电陶瓷的过载保护,将微动机构的运动范围定为 $[-16 \mu\text{m}, 16 \mu\text{m}]$ 。宏/微驱动机构要求宏动定位误差必须在微动运动范围内,宏动定位误差才可以通过微动机构得以补偿,实验结果表明该装置完全可以满足此要求。同时该装置也满足光栅拼接系统的精度要求:粗定位旋转误差 $5 \mu\text{rad}$ 、粗定位移动误差 $4 \mu\text{m}$ 和精定位旋转误差 $2.5 \mu\text{rad}$ 、精定位移动误差 $0.07 \mu\text{m}$,在实验过程中动光栅稳定性良好。

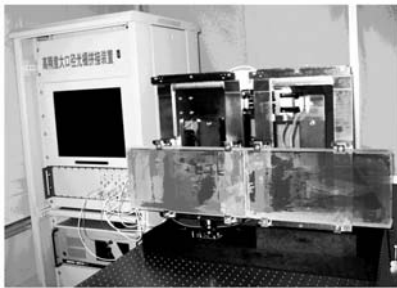


图 9 光栅拼接装置

Fig. 9 Grating tiling mechanism

参考文献:

- [1] 赵博,郝德阜.用拼接法获取大面积衍射光栅[J].光学精密工程,2000,8(5):503-507.
ZHAO B, HAO D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(5):503-507. (in Chinese)
- [2] 杨学东,夏兰,马伟新.光栅拼接旋转偏差实时监测调节实验[J].中国激光,2007,34(9):1222-1226.

表 1 实验结果

Tab.1 Experimental results

项目	X 移动 (μm)	Z 移动 (μm)	X 转动 (μrad)	Y 转动 (μrad)	Z 转动 (μrad)
宏动定位误差	3.6	3.4	4.4	3.5	3.2
微动定位误差	0.06	0.03	2	2	2

7 结论

本文在国内首次系统地开展了光栅拼接装置控制算法的研究。在全面分析研究国内外拼接光栅方法原理的基础上将该装置设计成新颖的宏/微结合双驱动并联进给机构^[14],明确以装置的控制算法为研究目标,提出了固定坐标系与动坐标系在初始位置重合的坐标系建立方法;按照具有被动链的并联机构的思想分析了宏动部分的 5PTS-1PPS 型并联机构和微动部分的 5TSP-1PPS 型并联机构,计算了两种并联机构的自由度,通过对两种并联机构的运动学逆解分析得到了宏/微结合并联进给机构的控制算法;最后分析了各种误差对装置定位精度的影响及误差修正方法。实验结果表明:宏动部分最大移动定位误差为 $3.6 \mu\text{m}$,最大转动定位误差为 $4.4 \mu\text{rad}$;微动部分最大移动定位误差为 $0.06 \mu\text{m}$,最大转动定位误差为 $2 \mu\text{rad}$,而且在实验过程中动光栅稳定性良好,以上指标满足光栅拼接系统的精度要求。由于实验的拼接控制系统采用了开环控制,所以定位误差较大,在今后工作中可以增加闭环反馈环节来提高系统的定位精度。

- YANG X D, XIA L, MA W X. Experiment of real-time monitoring and adjusting of rotation error about tiled gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007,34(9):1222-1226. (in Chinese)
- [3] ZHANG T J, YONEMURA M, KATO Y. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers[J]. *Optics Communications*, 1998,145(1-6): 367-376.

- [4] 张曙, HEISEL U. 并联运动机床[M]. 北京:机械工业出版社,2003:35-56.
ZHANG SH, HEISEL U. *Parallel kinematics machine tool* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003:35-56. (in Chinese)
- [5] 黄昔光, 廖启征, 李瑞玲. 基于四元数的台体型5SPS-1CCS并联机器人位置正解分析[J]. 机械工程学报,2007,43(5):8-13.
HUANG X G, LIAO Q Z, LI D L. Forward displacement analysis of generalized 5SPS-1CCS parallel robot mechanism based on quaternion[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007,43(5):8-13. (in Chinese)
- [6] WEN F, LIANG C G. Displacement analysis of the 6-6 Stewart platform mechanism[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1994,29(4):547-557.
- [7] GAO X S, LEI D L, LIAO Q Z. Generalized Stewart-Gough platforms and their direct kinematics[J]. *IEEE Trans. Robotics*, 2005,21(2):141-151.
- [8] RAGHAVAN M. The Stewart platform of general geometry has 40 configurations [J]. *ASME J. Mech. Des.*, 1993,115(1):227-282.
- [9] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000:46-53.
CAI Z X. *Robotics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000:46-53. (in Chinese)
- [10] 节德刚, 刘延杰, 孙立宁. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学精密工程, 2005,13(2):171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):171-178. (in Chinese)
- [11] 栗洋, 周晓光, 甘东明. 新型6-CCS并联机器人机构的结构分析及运动学仿真[J]. 新技术新工艺, 2006(12):33-35.
LI Y, ZHOU X G, GAN D M. Configurable analysis and kinematics simulation of the new 6-CCS parallel mechanism[J]. *New Technology & New Process*, 2006(12):33-35. (in Chinese)
- [12] 张秀峰, 孙立宁. 精密并联机器人控制算法及控制系统研究[J]. 机械工程学报, 2004,40(4):177-180.
ZHANG X F, SUN L N. Research of precise parallel robot control method and system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004,40(4):177-180. (in Chinese)
- [13] 高亮, 阙珊珊, 李敏. 压电陶瓷精密转动平台的转角精度测量[J]. 光学精密工程, 2007,15(2):206-211.
GAO L, KAN S S, LI M. Rotation-angle-accuracy measurement of piezo tilt platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):206-211. (in Chinese)
- [14] 张强, 卢泽生. 宏/微结合双驱动进给控制系统的建模与仿真研究[J]. 机械传动, 2006,30(4):16-19.
ZHANG Q, LU Z SH. Modeling and simulation of macro/micro feed drive control system [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2006,30(4):16-19. (in Chinese)

作者简介:



邵忠喜(1978—),男,黑龙江泰来人,博士研究生,主要从事数控技术、纤维铺放技术方面的研究。E-mail: sha-zhongxi78@163.com



张庆春(1959—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,主要从事超精密加工与纳米技术、精密非标设备的设计与制造、现代设计理论与方法的研究。E-mail: zqc@hit.edu.cn



白清顺(1974—),男,黑龙江勃利人,副教授,主要从事纳米加工仿真、现代设计理论与方法、金刚石刀具技术的研究。E-mail: Qshbai@hit.edu.cn

导师简介:



富宏亚(1963—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,主要从事数控技术,计算机在机械制造上的应用技术,现代制造系统的设计、制造及控制技术,复合材料缠绕成型技术和非标数控设备,纤维铺放技术等方面的研究。E-mail: hongyafu@hit.edu.cn