

DOI: 10.3901/JME.2015.10.205

机械式光栅拼接稳定性全闭环控制技术研究*

邵忠喜 韩德东 周维江 梁迎春
(哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 激光惯性约束聚变对机械式拼接光栅的稳定性提出更高的要求, 采用全闭环控制技术实现光栅拼接的高稳定性。为提高光栅装置的拼接精度, 分析柔性机构的运动性能, 从理论上推导精确的拼接机构运动控制算法; 以电容微位移传感器作为反馈元件, 研究动光栅位姿监测算法, 实现动光栅位姿的实时监测。综合应用拼接机构运动控制算法和光栅位姿监测算法, 实现光栅拼接稳定性的单神经元自校正 PID 全闭环控制; 设计了光学检测系统, 进行光栅拼接试验, 并测试拼接装置的运动精度和稳定性, 评估光栅拼接稳定性全闭环控制技术的可行性。试验结果表明拼接机构定位精度为 $0.2 \mu\text{rad}/\text{步}(\text{转动})$ 、 $10 \text{ nm}/\text{步}(\text{平动})$, 转动稳定精度小于 $1.2 \mu\text{rad}/30 \text{ min}$ 、平动小于 $24 \text{ nm}/30 \text{ min}(\text{平动})$, 满足光栅拼接任务的要求。

关键词: 惯性约束聚变; 光栅拼接; 高精度控制; 高稳定性控制; 位姿监测; 全闭环控制

中图分类号: TP273

Research on the Full Closed-loop Control Technology to the Stability of the Mechanical Grating Tiling

SHAO Zhongxi HAN Dedong ZHOU Weijiang LIANG Yingchun
(Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The inertial confinement fusion puts forward higher requirement on the stability of the mechanical grating tiling. The full closed-loop control technology is applied to achieve high stability of the grating tiling. In order to improve the stitching accuracy of the grating device, the motion performance of flexible mechanism is analyzed and the accurate motion control algorithm of the splicing mechanism is deduced in theory. With using the capacitive micro displacement sensor as the feedback element, the position and posture monitoring algorithm is derived. The single neuron adaptive PID full closed-loop control for the stability of the grating tiling is realized by comprehensive application of the motion control algorithm and the position and posture monitoring algorithm. The optics inspection system is designed to carry out the stitching experiment and the movement accuracy and stability of the splicing device are tested to evaluate the feasibility of the full closed-loop control to the stability of the grating tiling. The experimental results show that the stitching accuracy reaches $0.2 \mu\text{rad}/\text{step}(\text{rotation})$ and $10 \text{ nm}/\text{step}(\text{translation})$, and the stabilization precision is less than $1.2 \mu\text{rad}/30 \text{ min}(\text{rotation})$ and the translational accuracy is less than $24 \text{ nm}/30 \text{ min}(\text{translation})$. The stitching accuracy and the stabilization precision meet the requirement of the grating splicing task.

Key words: inertial confinement fusion; grating tiling; high precision control; high stability control; position and posture monitoring; full closed-loop control

0 前言

基于啁啾脉冲放大技术(Chirped pulse amplification, CPA)的超短脉冲激光系统能提供更能量、更高强度的激光, 为惯性约束聚变中快速点火试验提供了强有力的保障^[1]。该技术中的核心

部件是用于展宽和压缩激光脉冲的光栅。脉冲压缩光栅与强激光直接作用, 极易受到物理损伤, 因此增大其通光口径成为提高激光器输出能量强度的主要技术难题之一。由于增大光栅口径受限于基片材料、加工工艺及光学系统装调技术等, 因此制造米量级以上口径的光栅可以采用机械式光栅拼接技术获得^[2-3]。目前国外在这方面技术比较成熟, 但对于机构、算法等敏感问题未见详尽报道。国内在这方面的研究主要采用串联结构形式, 由于串联结构本身的稳定性、精度较并联结构差, 所以达到高精度、

* 国家自然科学基金(51475114)、2013 年度高等学校博士学科点专项科研基金(20132302120041)、黑龙江省自然科学基金(E201424)和中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2013051)资助项目。20140522 收到初稿, 20141110 收到修改稿

高稳定性的工程应用比较难。

在激光核聚变装置(Inertial confinement fusion, ICF)试验中,稳定性对于打靶成败起着至关重要的作用。为保证打靶成功,要求光栅在打靶过程中的稳定精度达到微弧度量级^[4-5]。本课题要求光栅拼接的稳定精度达到 $0.2 \mu\text{rad}/\text{步}$ (转动)、 $20 \text{ nm}/\text{步}$ (平动),稳定精度达到 $J_z < 50 \text{ nm}/30 \text{ min}$ (转动)、 $J_p < 10 \mu\text{rad}/30 \text{ min}$ (平动)。本文为实现光栅拼接装置在激光打靶过程中的高稳定性,对 5 自由度三拼装置的运动精度、基于电容传感器的位姿监测算法、稳定性 PID 全闭环控制技术、光栅拼接验证性试验等方面展开研究:分析了柔性光栅拼接机构的运动性能,从理论上推导了更加精确的运动控制算法,实现了装置的高精度拼接;以电容微位移传感器作为反馈元件,研究位姿监测算法,实现了动光栅位姿的实时监测;综合应用拼接机构运动控制算法和位姿监测算法,研究了光栅拼接稳定性单神经元自校正 PID 全闭环控制算法,实现了动光栅的高稳定性;最终设计了光学检测系统,对装置的拼接精度和稳定性进行了测试,试验结果满足激光打靶的要求。

1 拼接装置机构分析

三拼装置见图 1 所示,该机构实现三块光栅的高精度、高稳定性拼接,其机构类型属于 5PTSP-1PPS(PTSP 为主动链,数字“5”代表主动链的数量,P 为移动副,T 为万向副,S 为球副,PPS 为被动链,“1”表示被动链的数量,以下同理)串并混联机构,由 5PTS-1PPS 宏动并联机构与 5TSP-1PPS 微动并联机构组成,二者串联构成 5 自由度混联机构。宏动机构实现动光栅的大行程、低精度运动,微动机构实现动光栅的小行程、高精度运动及长时间的稳定。宏微运动切换采用螺杆螺母锁紧机构,进行微动调节时需要手动将螺杆与螺母拧紧。本文主要研究微动并联机构稳定性全闭环控制技术。



图 1 光栅拼接三拼装置

5TSP-1PPS 微动并联机构如图 2 所示,具有 5 条 TSP 无约束主动链与 1 条 PPS(5 自由度)恰约束被动链,6 条运动链采用三向正交、单点支撑的布局形式,这种机构类型具有如下优点:① 主动链实现机构多自由度运动,被动链承载光栅的大部分重量,保证机构具有刚度大、结构稳定、承载能力强的性能;② 机构类型属于并联机构,各关节不存在误差的累积和放大现象,机构精度高,同时便于运动求解。

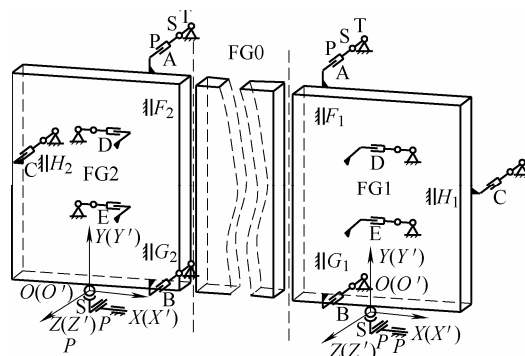


图 2 光栅拼接微动机构简图

如图 2 所示,微动机构由拼接机构和基准光栅两部分组成,拼接机构的作用是以静光栅 FG0 为基准,在满足拼接精度的前提下将动光栅 FG1、FG2 与静光栅 FG0 拼接为一个整体,使得三块小光栅具有一块完整大光栅的使用性能。微驱动模块是由闭环压电陶瓷和柔性铰链组成,固定在光栅夹具上,其运动副类型为移动副 P。闭环压电陶瓷的温漂问题已经在控制器内进行补偿,因此不需要考虑压电陶瓷的精度问题。微驱动模块和静平台之间通过柔性连接轴连接。柔性连接轴起到支撑和提供运动副的作用,可以简化成一端为球面副 S 和万向副 T 的连杆。动光栅采用钢球及平面组合结构(垂直安装的直线导轨)进行支撑、导向和定位,该结构可以认为是 PPS 被动链。PPS 被动链具有 5 自由度,恰好与动光栅的 5 个运动自由度一一对应,因此 PPS 被动链也是恰约束被动链。动光栅固定坐标系 OXYZ 的原点建立在动光栅下方支撑钢球的中心,各坐标轴方向如图 2 所示,且固定坐标系 OXYZ 与动坐标系 O'X'Y'Z'在初始位置完全重合。这种坐标系的建立方法由动光栅缺少沿 Y 轴方向移动自由度这个特点决定,便于并联机构的运动学分析。并联机构的布局形式如下:沿 Z 方向平行布置 3 条 TSP 主动链,主要实现动光栅 R_x (绕 X 轴转动)、 R_y (绕 Y 轴转动)、 P_z (沿 Z 轴平动)运动;沿 X 方向平行布置 2 条 TSP 主动链,主要实现动光栅 R_z (绕 Z 轴转动)、 P_x (沿 X 轴平动运动;被动链 PPS 沿着 Y 方向布置,限制了

机构的自由度形式为 R_X 、 R_Y 、 R_Z 、 P_X 、 P_Z 。其布局形式满足三向正交、单点支撑,保证了机构的稳定性^[6]。

为了实现动光栅拼接机构稳定性全闭环控制,分别在两块动光栅的夹具和静平台之间沿 Z 方向布置三个电容微位移传感器,如图 2 中所示的 F_1 、 G_1 、 H_1 和 F_2 、 G_2 、 H_2 ,用于实时监测动光栅的位姿变化。

2 拼接精度

装置的拼接精度是实现其高稳定性的前提,因此本文首先研究装置的拼接精度。

动光栅由 PPS 被动链支承,通过 5 条 TSP 主动链驱动实现其位姿调整。PPS 被动链中的移动副 P 采用高精度的直线导轨,摩擦因数极小,可以认为其能实现无摩擦平动。球面副 S 采用高精度的钢球,也可以认为其能够实现无摩擦转动。因此要实现光栅拼接的高精度控制,需要重点研究柔性机构(包括柔性连接轴和微驱动模块)的运动性能,并研究拼接机构精确的运动控制算法。

2.1 柔性机构运动特性

柔性连接轴和微驱动模块的运动性能对动光栅的位姿输出有着最直接的影响。在光栅拼接过程中,柔性连接轴应保持杆长不变,并能起到万向副 T 和球面副 S 的作用;微驱动模块作为驱动元件,应能准确输出运动控制算法解算出的控制量。

2.1.1 柔性连接轴运动特性

柔性连接轴是拼接机构中连接微驱动模块和静平台的关键部件。同时在整个并联驱动系统中,柔性连接轴也是实现系统解耦控制的转动支撑点。因此,柔性连接轴的轴向刚度和径向刚度是影响控制系统能否实现预定运动精度的关键指标。图 3 为拼接机构设计中柔性连接轴的有限元分析结果。

由有限元分析结果得出柔性连接轴的轴向刚度为 $50.2 \text{ N}/\mu\text{m}$,应力为 110 MPa ;径向刚度为 $0.0425 \text{ N}/\mu\text{m}$,应力为 18 MPa ,变形发生在过渡圆弧处^[7]。因此在光栅拼接过程中,柔性连接轴能保持杆长不变,并且具有任意方向的转动,能起到万向副 T 和球面副 S 的作用。

2.1.2 微驱动模块运动特性

为了保证压电陶瓷与柔性铰链可靠接触且满足位移输出的线性要求,需要对微驱动模块施加预紧力,通过压电陶瓷驱动器的压力反馈信号判断预紧力是否满足要求。预紧后的微驱动模块的运动特性(即位移输入输出特性)发生变化,需要离线测试其运动特性。如图 4 所示某个微驱动模块正向步进

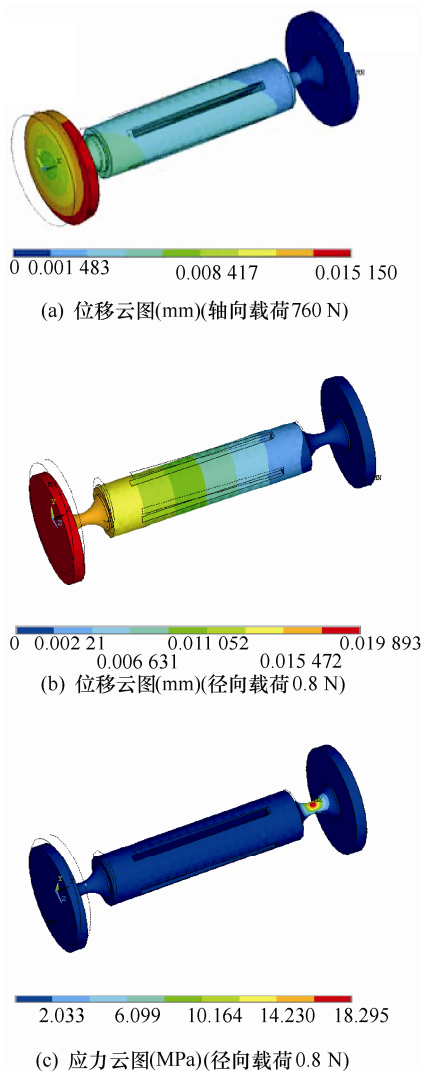


图 3 柔性连接轴的有限元分析结果

和反向步进各 16 组试验数据。

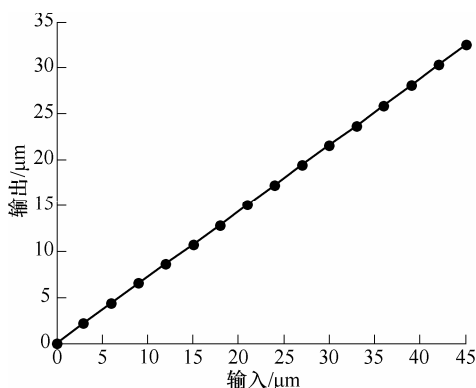


图 4 微驱动模块运动特性

为了实际应用的方便,本文将正向步进曲线和反向步进曲线取平均,经过验证用 6 次多项式去拟合时,偏差最小,最大偏差为 6 nm (经计算,偏差产生平动最大误差为 6 nm ,转动最大误差为 $0.08 \mu\text{rad}$),满足拼接精度要求,得到该微驱动模块的运动特性为

$$p_o = -2.477 \times 10^{-9} p_i^6 + 3.996 \times 10^{-7} p_i^5 - 2.426 \times 10^{-5} \times p_i^4 + 6.844 \times 10^{-4} p_i^3 - 8.660 \times 10^{-3} p_i^2 + 0.754 p_i - 0.005 \quad (1)$$

式中 p_o ——微驱动模块的位移输出值;

p_i ——微驱动模块的位移输入值。

2.2 拼接机构运动控制算法

如图 5 所示, 动光栅位姿变化过程中, 每条运动链上的万向副 $T(t_X, t_Y, t_Z, 1)$ 位置固定, 柔性连接轴 TS 在动光栅位姿变化过程中杆长不变, 即 $|TS| = |TS'|$ 。在微位移驱动模块的运动轴线上除 S 外任选一点 $Q(q_X, q_Y, q_Z, 1)$, 点 Q 相对于动光栅的位置固定。动光栅在微驱动模块的驱动下由位姿 1 运动到位姿 2, Q 点也随动光栅运动到 $Q'(q'_X, q'_Y, q'_Z, 1)$ 点, Q' 的坐标由(1)式计算得到。

$$(q'_X, q'_Y, q'_Z, 1)' = {}^0T(q_X, q_Y, q_Z, 1)' \quad (2)$$

式中, 0T 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。

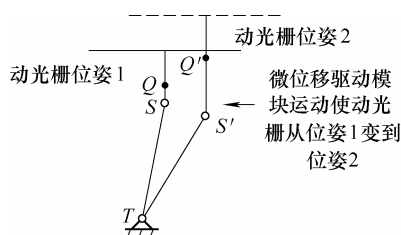


图 5 微动拼接机构运动简图

设 QS 的方向矢量为 $\mathbf{i} = (i_X, i_Y, i_Z, 0)$, $Q'S'$ 的方向矢量为 $\mathbf{i}' = (i'_X, i'_Y, i'_Z, 0)$, \mathbf{i}' 由式(2)计算得到。

$$(i'_X, i'_Y, i'_Z, 0)' = {}^0Tr(i_X, i_Y, i_Z, 0)' \quad (3)$$

式中, 0Tr 为动坐标系 O' 相对于固定坐标系 O 的齐次旋转变换矩阵, 表示动光栅的旋转变换。

记 SQ 的杆长为 d_0 , $S'Q'$ 的杆长为 d , 对应每条运动链上的微位移驱动模块的输入位移为

$$P = d - d_0 \quad (4)$$

由于

$$TS = \sqrt{(q_X + di'_X - t_X)^2 + (q_Y + di'_Y - t_Y)^2 + (q_Z + di'_Z - t_Z)^2} \quad (5)$$

则

$$d = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6)$$

式中

$$a = i'^2_X + i'^2_Y + i'^2_Z$$

$$b = 2(q_X - t_X)i'_X + 2(q_Y - t_Y)i'_Y + 2(q_Z - t_Z)i'_Z$$

$$c = (q_X - t_X)^2 + (q_Y - t_Y)^2 + (q_Z - t_Z)^2 - |TS|^2$$

取较小值 $d = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$, 代入式(4)得对应

每条运动链上的微驱动模块的输入位移

$$P = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} - d_0 \quad (7)$$

3 动光栅位姿监测算法

根据 KESSLER 等^[3]提出的配对误差补偿^[8]理论, 动光栅沿 Z 轴的平动误差和沿 X 的平动误差对光束的影响相似, 绕 X 轴的旋转误差和绕 Z 轴的旋转误差对光束的影响相似, 在调整过程中可以通过调整动光栅沿 Z 轴的平动误差来抵消沿 X 的平动误差, 调整绕 X 轴的旋转误差来抵消绕 Z 轴的旋转误差。同时考虑到结构上电容微位移传感器布局的方便, 只需要针对微动拼接机构实现 R_X 、 R_Y 和 P_Z 三个运动自由度的全闭环控制即可。

工作环境中的振动(主要是真空机组和空调)会导致动光栅位姿变化, 反映到电容微位移传感器上只是线位移的变化。因此要研究由电容微位移传感器线位移变化量求得动光栅位姿变化量的位姿监测算法。

如图 6 所示, 以动光栅 FG1 为例, 设三个电容微位移传感器的初始坐标值分别为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1 = (f_{1X} & f_{1Y} & f_{1Z} & 1) \\ \mathbf{G}_1 = (g_{1X} & g_{1Y} & g_{1Z} & 1) \\ \mathbf{H}_1 = (h_{1X} & h_{1Y} & h_{1Z} & 1) \end{cases} \quad (8)$$

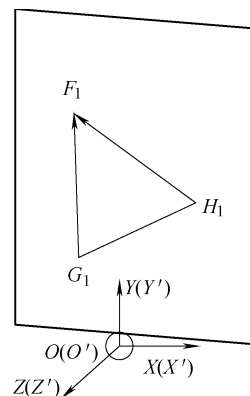


图 6 电容微位移传感器位置简图

设动光栅位姿变化引起三个电容微位移传感器 F_1 、 G_1 、 H_1 反馈值的变化量分别为 Δf_{1z} 、 Δg_{1z} 、

Δh_z , 由于三个电容微位移传感器都是沿着 Z 方向布置, 故各电容微位移传感器的实时坐标值为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1' = (f_{1X} & f_{1Y} & f_{1Z} + \Delta f_{1Z} & 1) \\ \mathbf{G}_1' = (g_{1X} & g_{1Y} & g_{1Z} + \Delta g_{1Z} & 1) \\ \mathbf{H}_1' = (h_{1X} & h_{1Y} & h_{1Z} + \Delta h_{1Z} & 1) \end{cases} \quad (9)$$

在结构上电容微位移传感器 F1 和 G1 的连线与 Y 轴平行。设动坐标系 $O'x'y'z'$ 坐标轴单位矢量分别为 $\mathbf{i}_{X'}$, $\mathbf{i}_{Y'}$, $\mathbf{i}_{Z'}$ 。动光栅的姿态可以用 $\mathbf{i}_{X'}$, $\mathbf{i}_{Y'}$, $\mathbf{i}_{Z'}$ 表示, 即

$$\mathbf{i}_{Y'} = \frac{\mathbf{G}_1' \mathbf{F}_1'}{|\mathbf{G}_1' \mathbf{F}_1'|} \quad (10)$$

$$\mathbf{i}_{Z'} = \frac{|\mathbf{G}_1' \mathbf{F}_1' \times \mathbf{H}_1' \mathbf{F}_1'|}{|\mathbf{G}_1' \mathbf{F}_1' \times \mathbf{H}_1' \mathbf{F}_1'|} \quad (11)$$

$$\mathbf{i}_{X'} = \mathbf{i}_{Y'} \times \mathbf{i}_{Z'} \quad (12)$$

设固定坐标系 $OXYZ$ 坐标轴对应的单位矢量分别为 \mathbf{i}_X , \mathbf{i}_Y , \mathbf{i}_Z , 动光栅绕 X 轴的旋转角为 γ , 绕 Y 轴的旋转角为 β , 绕 Z 轴的旋转角为 α , 沿 X 轴的平动量为 p_x , 沿 Y 轴的平动量为 p_y , 沿 Z 轴的平动量为 p_z , 根据齐次坐标变换理论^[9], 动坐标系 $O'X'Y'Z'$ 相对于固定坐标系 $OXYZ$ 的齐次坐标变换矩阵 oT 为

$${}^oT = \begin{pmatrix} \mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_Y & \mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_Z & p_x \\ \mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_Y & \mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_Z & p_y \\ \mathbf{i}_{Z'} \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_{Z'} \cdot \mathbf{i}_Y & \mathbf{i}_{Z'} \cdot \mathbf{i}_Z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (T_1, T_2, T_3, T_4) \quad (13)$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\alpha \\ \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha + \cos\gamma\sin\alpha \\ -\cos\gamma\sin\beta\cos\alpha + \sin\gamma\sin\alpha \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} -\cos\beta\sin\alpha \\ -\sin\gamma\sin\beta\sin\alpha + \cos\gamma\cos\alpha \\ \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha + \sin\gamma\cos\alpha \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$T_3 = \begin{pmatrix} \sin\beta \\ -\sin\gamma\cos\beta \\ \cos\gamma\cos\beta \\ 0 \end{pmatrix} \quad T_4 = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{pmatrix}$$

由式(13)中矩阵每个元素对应相等可以求得动光栅的各旋转角为

$$\beta = \arcsin(\mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_Z) \quad (14)$$

$$\alpha = \arcsin\left(-\frac{\mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_Y}{\cos\beta}\right) \quad (15)$$

$$\gamma = \arcsin\left(-\frac{\mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_Z}{\cos\beta}\right) \quad (16)$$

分析齐次坐标变换的特性可知, 旋转变换和平移变换是线性叠加的, 则可以利用动光栅上任一点 G 可求得动光栅的平动位置 P 为

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 0 \end{pmatrix} = {}^oG + {}^oTr \cdot {}^oG \quad (17)$$

式中 oG ——点 G 在固定坐标系 O 下的坐标;

oG —— G 在动坐标系 O' 下的坐标;

oTr ——动坐标系 $O'X'Y'Z'$ 相对于固定坐标系 $OXYZ$ 的旋转变换矩阵

$${}^oTr = \begin{pmatrix} \mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_Y & \mathbf{i}_{X'} \cdot \mathbf{i}_Z & 0 \\ \mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_Y & \mathbf{i}_{Y'} \cdot \mathbf{i}_Z & 0 \\ \mathbf{i}_{Z'} \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_{Z'} \cdot \mathbf{i}_Y & \mathbf{i}_{Z'} \cdot \mathbf{i}_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

由于本设计方案只沿 Z 轴布置了三个电容微位移传感器, 故只能检测出动光栅 RX 、 RY 和 PZ 三个自由度的位姿变化, 故取 γ 、 β 和 p_z 作为动光栅位姿监测算法的计算公式。

根据公式编制 Matlab 程序对位姿监测算法进行验证。当给定动光栅绕 X 轴旋转角 $\gamma = 30.00 \mu\text{rad}$ 、绕 Y 轴旋转角 $\beta = -41.00 \mu\text{rad}$ 、沿 Z 轴平动量 $p_z = 10.00 \mu\text{m}$ 时: 由位姿监测算法得出的结果是 $\gamma = 30.00 \mu\text{rad}$ 、 $\beta = -41.00 \mu\text{rad}$ 、 $p_z = 10.00 \mu\text{m}$ 。根据理论计算结果可知, 位姿监测算法可以精确解算出动光栅姿监变化量。

4 光栅拼接稳定性单神经元自校正 PID 全闭环控制

工作环境中的振动(主要是真空机组和空调)会影响拼接光栅的稳定性。为了有效抑制工作环境中的振动对拼接光栅的影响, 提高光栅拼接的稳定性, 本文综合运用拼接机构运动控制算法和动光栅位姿

监测算法,采用单神经元自校正 PID 控制算法^[10-11]实现微动拼接机构的稳定性全闭环控制。如图 7 所示,单神经元自校正 PID 控制环节以动光栅理想

位姿作为输入,以动光栅实际位姿作为反馈进行 PID 调节输出,实现微动拼接机构的稳定性全闭环控制。

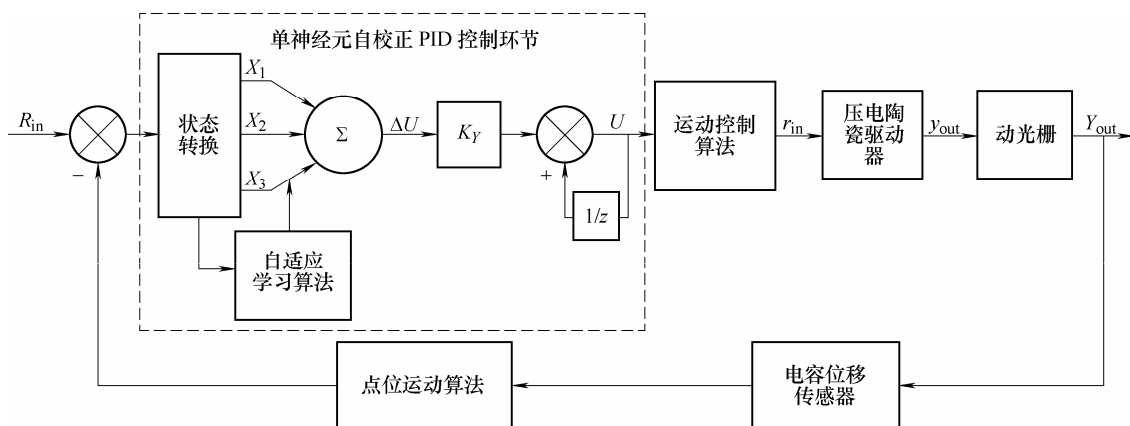


图 7 单神经元自校正 PID 全闭环控制框图

单神经元自适应控制器按照有监督的 Hebb 学习规则调整加权系数以实现自适应、自学习功能,其控制算法及学习算法为

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k) \\ \omega'_i(k) = \omega_i(k) / \sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)| \\ \omega_1(k) = \omega_1(k-1) + \eta_I z(k) u(k) x_1(k) \\ \omega_2(k) = \omega_2(k-1) + \eta_P z(k) u(k) x_2(k) \\ \omega_3(k) = \omega_3(k-1) + \eta_I z(k) u(k) x_3(k) \\ x_1(k) = z(k) = e(k) = r(k) - y(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (19)$$

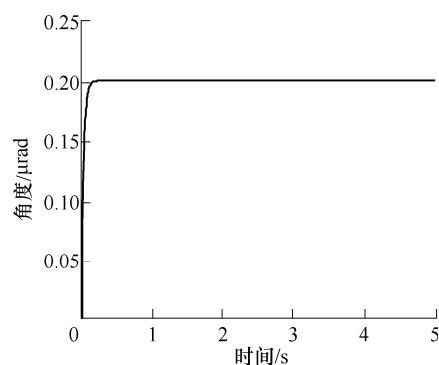
式中, η_P 、 η_I 、 η_D 分别对应比例学习速率、积分学习速率、微分学习速率, K 为神经元的比例系数。

根据公式编制 Matlab 程序结合 ADAMS 对以上单神经元 PID 全闭环控制算法进行仿真。给定动光栅理想位姿如下: $R_x = 0.2 \mu\text{rad}$ 、 $R_y = -10.0 \mu\text{rad}$ 、 $P_z = 0.1 \mu\text{m}$, 仿真结果如图 8 所示。

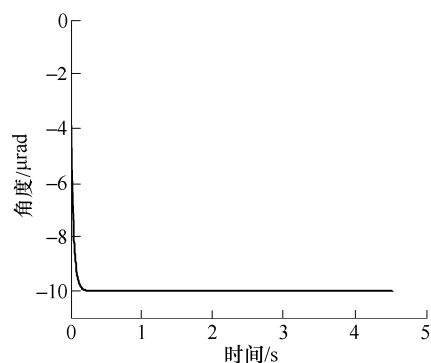
由图 8 可以看出通过配置合理的 PID 控制参数,单神经元自校正 PID 全闭环控制能实现动光栅位姿的无超调、无振荡、快速响应控制。

5 光栅拼接稳定性试验

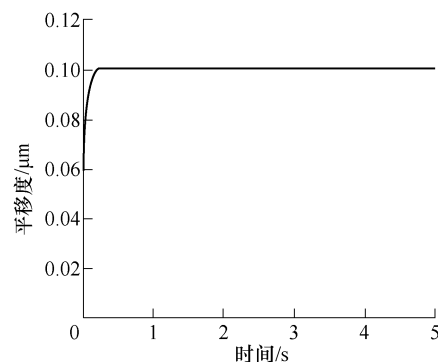
试验目的:通过测定动光栅各自由度的运动精度,检测拼接机构的调整精度是否满足光栅拼接的要求,验证位姿监测算法和单神经元自校正 PID 全闭环控制的正确性;通过稳定性试验测定拼接机构



(a) 绕 X 轴旋转自由度 R_x 的仿真结果



(b) 绕 Y 轴旋转的自由度 R_y 的仿真结果



(c) 沿 Z 轴平移自由度 P_z 的仿真结果

图 8 动光栅位姿输出

的稳定性能否满足要求。

试验条件: 由于光栅拼接要求实现纳米量级和微弧度量级的调整精度, 工作环境中振动对试验结果影响很大, 因此试验需要在恒温、恒湿、安静和高洁净度的实验室进行, 同时拼接装置必须固定在隔振平台上, 隔振平台固定在隔振地基上。

光学检测系统如图 9 所示, 光源发出的光通过聚焦透镜 L1、L2 扩束后, 透过半反镜 M1 由反射镜 M2 反射到达静光栅 FG0 和动光栅 FG1 的交界处, 经反射镜 M4 的反射光与光栅反射光发生干涉, 干涉光经过反射镜 M2、半反镜 M1 和反射镜 M3 的作用透过聚焦透镜 L3 聚焦成像到 CCD 上, 再由数据采集卡采集干涉图像送入计算机处理。

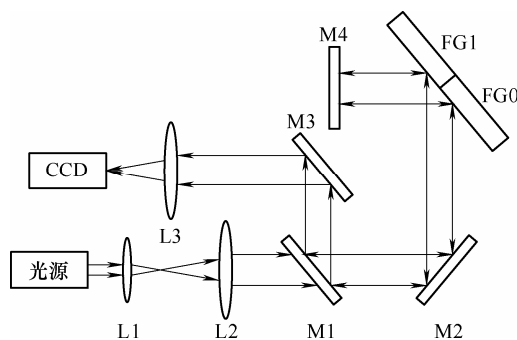


图 9 光学检测系统图

通过试验测量动光栅运动前后的位姿, 拼接精度如下: 拼接定位最大旋转误差 $0.2 \mu\text{rad}$, 最大移动误差 10 nm 。如图 10 所示, 零级光和一级光光斑分别重合, 证明拼接机构的拼接精度满足光栅拼接要求。

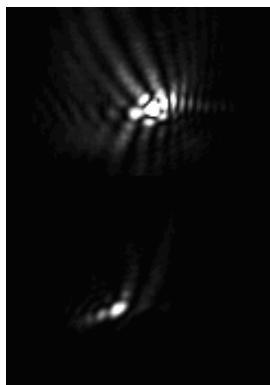
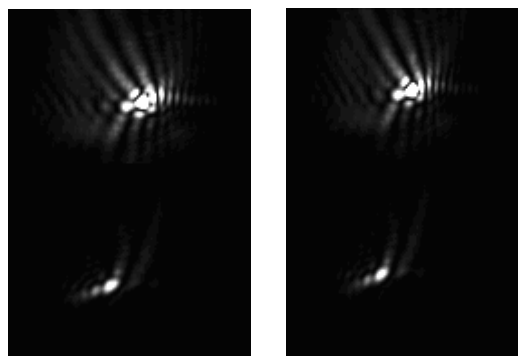


图 10 拼接光斑截图

光栅的稳定性通过检测一定时间内干涉图像中动光栅对应光斑相对于静光栅对应光斑的位置变化来测定, 如图 11 所示, 图 11a 是试验开始时的光斑截图, 图 11b 是试验进行到 30 min 时的光斑截图。试验结果表明, 在 30 min 的稳定性测试中, 动光栅转动自由度最大变化值为 $1.2 \mu\text{rad}$, 移动自由度最大变化量为 24 nm 。



(a) 初始光斑

(b) 30 min 后光斑

图 11 稳定性光斑截图

6 结论

本文针对光栅拼接高精度、高稳定性, 系统地开展了光栅拼接稳定性全闭环技术的理论和试验研究, 结论如下。

(1) 分析了柔性机构的运动性能, 从理论上推导了更加精确的运动控制算法。

(2) 以电容微位移传感器作为反馈元件, 研究了位姿监测算法, 实现了动光栅位姿的实时监测。

(3) 综合应用拼接机构运动控制算法和动光栅位姿监测算法, 实现了光栅拼接单神经元自校正 PID 全闭环控制。

(4) 设计了光学检测系统, 对装置的拼接精度和稳定性进行了测试。试验结果表明全闭环并联拼接机构方案适合光栅拼接, 拼接后的三块小光栅具有一块大光栅的使用性能, 拼接机构定位最大旋转误差 $0.2 \mu\text{rad}$, 最大移动误差 10 nm 。在稳定性试验中, 动光栅转动自由度的最大变化量为 $1.2 \mu\text{rad}/30 \text{ min}$, 移动自由度最大变化量为 $24 \text{ nm}/30 \text{ min}$ 。

本文阐述的机械式光栅拼接稳定性全闭环控制技术能够满足光栅拼接高精度、高稳定性的要求。

参 考 文 献

- [1] PERRY M D, PENNINGTON D, STUART B C, et al. Petawatt laser pulses[J]. Opt. Lett., 1999, 24(3): 160-162.
- [2] ZHAO B, HAO D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(5): 503-507.
- [3] KESSLER T, BUNKENBURG J, HU H, et al. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. Optics Letter, 2004, 29(6): 635-637.
- [4] YANG Y C, WANG X, ZHANG J W, et al. Automatic phase-locked control of grating tiling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 262-267.

- [5] 周忆, 廖云飞, 刘有海, 等. 大口径光栅拼接装置的微震动响应分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(7): 49-53.
ZHOU Yi, LIAO Yunfei, LIU Youhai, et al. The micro-vibration analysis for the large aperture grating tiling device[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(7): 49-53.
- [6] 邵忠喜, 张庆春, 白清顺, 等. 高精度大口径光栅拼接装置的控制算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 158-165.
SHAO Zhongxi, ZHANG Qingchun, BAI Qingshun, et al. Design method of controlling device for tiling high precision and large aperture grating[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 158-165.
- [7] 姜涛. 大口径光栅机械拼接机构的关键特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
JIANG Tao. Research on the key characteristics of large mosaic grating's mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [8] ZENG Lijiang, LI Lifeng. Method of making mosaic gratings by using a two-color heterodyne interferometer containing a reference grating[J]. Opt. Lett., 2006, 31: 152-155.
- [9] 王瑞, 王知行, 钟诗胜. 七轴混联机床机构干涉校验算法及工作空间快速校验的研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 221-225.
WANG Rui, WANG Zhixing, ZHONG Shisheng. Research on the mechanism interfere calibration and fast verification of workspace in 7-axis parallel serial machine tool[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 221-225.
- [10] 刘金琨. 先进 PID 控制器 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
LIU Jinkun. Simulation of the advanced PID controller in Matlab[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2003.
- [11] 王聪, 杜丽, 张俊伟, 等. 采用改进的单神经元 PID 控制算法提高光栅拼接精度的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502014-1-0502014-5.
WANG Cong, DU Li, ZHANG Junwei, et al. Advancing precision of grating tiling with modified single neuron adaptive PID control algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0502014-1-0502014-5.

作者简介: 邵忠喜(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为纤维铺放技术、数控技术、CAD/CAM 技术等。

E-mail: shaozhongxi78@163.com

韩德东, 男, 1962 年出生, 工程师。主要研究方向为数控技术、计算机在机械制造上的应用技术、模具 CAD/CAM 等。

E-mail: handd@hit.edu.cn

周维江, 男, 1987 年出生。主要研究方向为并联机构及数控技术。

E-mail: zwjcsalut@163.com