

文章编号 1004-924X(2024)15-2374-13

多通道双晶单色器平行度测量与运动轨迹规划

鲁浩林¹, 刘卯卯², 何思宇¹, 冯朝¹, 张小威³, 唐琳², 何建华², 肖晓晖^{1*}

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学 先进光源研究中心, 湖北 武汉 430072;

3. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

摘要:针对双转轮多通道双晶单色器的平行度误差补偿问题,提出一种基于光电自准直仪的多通道双晶单色器准静态双晶衍射面平行度测量方法以及一种S形曲线轨迹规划方法。分析多通道单色器的结构及运动特点,基于光电自准直仪提出多通道双晶单色器平行度测量系统的总体框架及测量具体流程。结合多通道双晶单色器运动特点,提出一种S形曲线轨迹规划方法,并基于平行度测量结果对单色器运动轨迹进行优化设计。最后,在搭建的实验平台上开展准静态平行度测量实验及运动轨迹跟踪实验。结果表明:所搭建的平行度测量系统的平行度分辨率达0.5",相邻两组晶体角度跃迁差值在百角秒量级;所提S形曲线轨迹规划算法将轨迹跟踪误差抑制在6.1",相比传统5阶多项式及未规划轨迹,跟踪误差分别降低58.7%和63.9%。实验结果验证了所提方法有效性,对改进双转轮多通道双晶单色器性能具有良好的实际应用价值。

关键词:同步辐射X射线;双晶单色器;误差补偿;平行度测量;轨迹规划

中图分类号:TH74;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243215.2374

Parallelism measurement and trajectory planning of multi-channel double crystal monochromator

LU Haolin¹, LIU Maomao², HE Siyu¹, FENG Zhao¹, ZHANG Xiaowei³,

TANG Lin², HE Jianhua², XIAO Xiaohui^{1*}

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China ;

2. Advanced Light Source Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China ;

3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: xhxiao@whu.edu.cn

Abstract: To address parallelism error compensation in a dual-rotation multi-channel double crystal monochromator (DCM), we propose a method using an autocollimator to measure the quasi-static parallelism of diffraction surfaces and an S-curve trajectory planning method. First, we analyze the structure and motion of the monochromator. Then, we present a measurement system framework using the autocollimator. We also propose an S-curve trajectory planning algorithm to optimize the motion trajectory based on parallelism measurements. Finally, experiments on the constructed platform show that the measurement system achieves a 0.5" resolution, with crystal angle transitions varying by hundreds of arcseconds. The S-curve

收稿日期:2024-04-03;修订日期:2024-05-31.

基金项目:湖北省科技重大专项(No. 2021AFB001)

planning algorithm reduces trajectory tracking error by 58.7% and 63.9% compared to a 5th order polynomial and unplanned trajectories, respectively, with a 6.1" tracking error. These results confirm the method's efficacy in enhancing the performance of the monochromator.

Key words: synchrotron radiation X ray; double crystal monochromator; error compensation; parallelism measurement; trajectory planning

1 引言

双晶单色器(Double Crystal Monochromator, DCM)是快扫X射线吸收精细结构(Quick-scanning X-ray Absorption Fine Structure, QX-AFS)实验方法的核心设备,承担着单色化硬X射线的重要任务,其性能直接决定了单色光的稳定性并最终影响吸收光谱的质量^[1]。传统双晶单色器由一对平行安装在转台上的硅晶体及其调节机构组成,转台由一个步进电机驱动旋转。系统运行时,单色器在某一设定角度附近往复转动以改变布拉格角度,输出波长连续变化的单色X射线,实现光谱扫描^[2]。

随着第四代同步辐射光源的发展,同步辐射的亮度和通量得到进一步提升,这对单色器的性能提出了更高的要求。然而,传统单通道双晶单色器在实际运行过程中面临往复振荡^[3]及高热负载^[4]等问题,不仅影响成谱质量,也给扫谱频率及扫谱精度的提升造成了极大的困难。对此,文献[5]提出了一种单方向连续转动的高速双转轮多通道双晶单色器构想。该结构主要由两个正多棱柱转轮组成,多枚分光晶体置于侧柱面,主、从转轮分别由两个伺服电机直驱,在单向匀速旋转时依次形成多个动态的双晶单色器通道,且多枚分光晶体均摊热负载,提高了系统的运动稳定性以及热稳定性。通过实施高性能运动控制策略^[6]和增加晶片数目,多通道单色器的扫谱频率及扫谱精度相比传统单色器得到了有效的提升。然而,晶片贴装及系统加工、装配等带来的机械误差会导致主、从转轮无法保持理想正多棱柱形体,双轴匀速转动时会产生周期性的平行度误差,造成双晶衍射面失谐,影响光谱扫描质量。因此,多通道双晶单色器的关键在于双晶衍射面平行度误差的测量及补偿,需搭建平行度测量系统,并基于测量结果规划单色器运动轨迹,及时

调控从轴运动状态,以补偿平行度误差,同时避免振荡,减小系统冲击,保持扫谱性能。

考虑到单色器光学表面结构及使用环境,常用光学衍射法、自准直法和激光干涉法等非接触测量方法测量其运动参数。光学自准直法具有高精度、高可靠性等优点,广泛应用在高精密系统的平行度测量中。文献[7]基于改进的光笔干涉仪法提出了双晶单色器平行度测量方法,克服自准直法测量晶面绝对平行度的缺陷,实现了晶面投角和滚角方向的二维测量。文献[8-9]基于光电自准直仪设计了单色器双晶运动性能测试系统,可高精度测量双晶转角位移,为单色器的结构优化提供参考。文献[10]提出基于光笔干涉法的晶体单色器平行度测量方法,克服自准直法的局限性,实现连续衍射面的平行度误差测量。然而,上述研究是针对传统单通道双晶单色器,不适用于多通道双晶单色器中双轴转动的平行度测量场景。因此,本文借鉴光学自准直法工作原理,在分析多通道单色器运动特性的基础上,提出基于光电自准直仪的多通道双晶单色器准静态平行度测量方案。

在获取准静态平行度误差测量结果后,需基于此对单色器运动轨迹进行规划,以动态补偿平行度误差。合理的运动轨迹规划对实现有效补偿至关重要。传统线性插补轨迹会导致运动参量不连续,影响轨迹跟踪精度和平行度控制^[11]。S形曲线因其平滑特性,常用于光刻机工件台、精密转台等高精度点对点运动场合的轨迹规划^[12-14],能使轨迹加速度、加加速度曲线平滑过渡,减小冲击,提高系统精度。文献[15]使用分段Sigmoid函数构造时间最优的S形曲线轨迹规划策略,并在六轴机械臂上验证其性能。文献[16]在传统算法的基础上,结合动力学约束条件,明确了S形曲线轨迹参数的取值方法,并应用于精密转台的运动控制,显著改善了转台精

度。文献[17]以多通道双晶单色器为背景,基于分形对称思想提出了递归式定时S形曲线轨迹规划方法。虽然S形曲线轨迹规划算法有许多,但在实际应用中大多忽略了被控对象的加速度、加加速度上限等真实物理约束,这可能会导致轨迹规划的运动滞后。

因此,为实现双转轮多通道双晶单色器的平行度测量需求,本文提出基于光电自准直仪的多通道双晶单色器准静态平行度测量方案,为补偿测量单色器的周期性平行度误差,提出一种考虑真实物理约束的S形曲线轨迹规划方法,并基于测量结果对单色器运动轨迹进行优化设计,以实现在双轴转动过程中的高精度误差补偿。最后,搭建多通道双晶单色器平行度测量及运动实验平台,开展准静态双晶衍射面平行度测量实验,并基于测量结果规划单色器运动轨迹,开展轨迹跟踪实验,验证了所提方法有效性。

2 原理

图1为多通道双晶单色器和QXAFS实验装置的工作原理。实验装置主要由光源、狭缝、双晶单色器、电离室和样品室等组成。同步辐射光源射出的X射线白光经狭缝准直后,入射到双晶单色器被单色化,得到单一能量的单色X射线,再次经过狭缝后,依次穿过电离室1、样品、电离室2,通过采集样品前后电离室的光电流信号,从而计算出样品在该能量点的吸收系数。

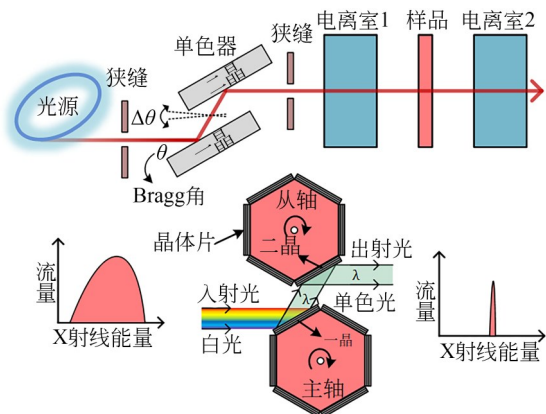


图1 QXAFS实验装置及多通道双晶单色器

Fig.1 Principle diagram of QXAFS and multi-channel DCM

同步辐射白光含有多种能量成分,入射到一品并发生布拉格衍射后,只有波长满足布拉格衍射方程的单色光得到相干加强,被选择到二晶,并被二晶反射成平行于入射光的出射单色光。入射光与一品之间的掠射角 θ 称为布拉格角,决定单色光的能量。系统运行时,只需往复转动单色器,改变布拉格角,即可输出能量连续变化的单色X射线,实现光谱扫描。值得注意的是,在往复转动模式下,高功率白光长时间集中照射一品核心区域,会造成高热负载,易引起晶格形变导致双晶失谐,影响成谱质量。同时,不稳定的往复运动形式易引起系统振荡,不利于系统精度以及扫谱频率的提升。

区别于传统单色器的双平晶,多通道双晶单色器由一对按照特定几何关系配置的正多棱柱转轮组成,主、从转轮的侧柱面均贴装晶片,并分别由两个电机轴直驱。主轴上的每一片晶体都与从轴上的另一片晶体一一对应。在单向转动过程中,主、从轴需相互配合,在各对晶体片转动到入射X射线处时保持动态平行,依次形成多个动态单色器通道,实现QXAFS分光需求。与传统单通道单色器相比,多通道单色器进行单向圆周运动,运动形式更加平稳,有利于提高系统精度及扫谱频率;多枚晶片依次均摊高功率热负载,可采用水冷代替液氮冷却,降低系统冷却成本;只需提高转速及增加晶体片数,即可提高扫谱频率。然而,单纯的匀速转动不能保证双晶的动态平行度,晶片贴装以及系统加工、组装等带来的误差会引起双晶之间的平行度误差。文献[6]分析了多通道单色器平行度误差的主要来源,包括晶片贴装误差、轴心误差以及轴线误差等,其对晶片在投角方向上的综合影响如图2所示。

每个单色器通道都存在一个由初始角度偏差引起的固有平行度误差,相邻通道在切换时还会产生一个角度跃迁变化,并随着双轮的圆周运动周期性出现。因此,需要对单色器进行平行度误差测量,并基于测量数据规划单色器的运动轨迹,以便在通道切换过程中及时调控双轮运动状态,对平行度误差进行补偿。

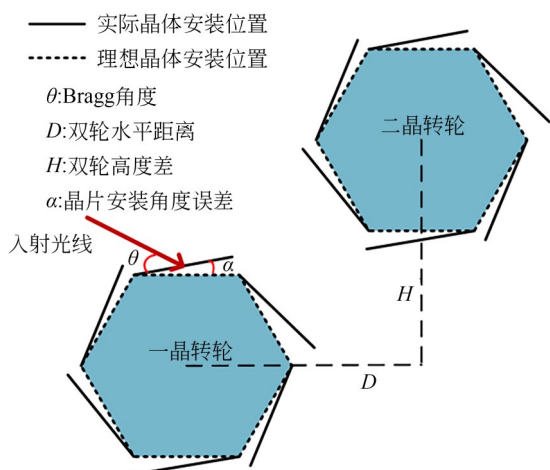


图2 多通道双晶单色器平行度误差

Fig. 2 Parallelism error of multi-channel double crystal monochromator

3 准静态平行度测量方案

3.1 光电自准直仪

光电自准直仪是一种高精度小角度光学测量仪器,广泛应用于计量测量、科研生产等技术领域,其工作原理如图3所示。它主要由激光光源、狭缝、分束器、准直物镜、反射镜以及CCD线阵感光单元等组成。狭缝位于物镜焦平面上,光线经狭缝与分束器后,被物镜聚焦为光轴平行光。光束射向反射镜后原路返回,经分束器反射到CCD探测器上形成光斑。反射镜在投角方向上发生 α 角度的偏移,此时反射光束会产生 2α 的偏角,CCD上的成像光斑朝Y方向偏离初始位置。偏移量 ΔD_y 满足:

$$\Delta D_y = f \tan(2\alpha), \quad (1)$$

其中 f 为准直物镜焦距。当偏转角度较小时, $\tan(2\alpha) \approx 2\alpha$,因此式(1)可进一步简化为:

$$\alpha = \frac{\Delta D_y}{2f}. \quad (2)$$

同理,当反射镜在滚角方向上发生 β 角度的偏移时,反射光束会产生 2β 的偏角,CCD光斑朝X方向偏移,偏移量为 ΔD_x ,那么有:

$$\beta = \frac{\Delta D_x}{2f}. \quad (3)$$

光电自准直仪通过测量光斑位置的偏移量,即可计算反射镜的偏移角度。当CCD检测得到

光斑偏移像素数目为 N_x 与 N_y ,像素单元单位尺寸为 a 时,则有:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{N_x a}{2f} \\ \beta = \frac{N_y a}{2f} \end{cases}. \quad (4)$$

根据上述工作原理,利用光电自准直仪测量单色器的平行度误差时,可将单色器置于准直物镜与反射镜之间,分别转动晶片,观察并记录CCD上光斑的移动情况,即可得到单色器的平行度误差。

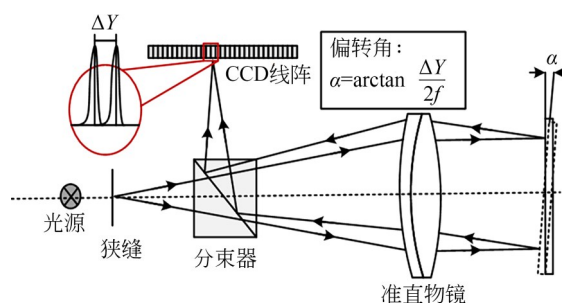


图3 光电自准直仪的工作原理

Fig. 3 Working principle of photoelectric autocollimator

3.2 测量总体方案

考虑晶片安装导致的初始角度偏差,本文利用光电自准直仪的工作原理和响应特性来构建一个准静态平行度误差高精度测量系统。以正六棱柱转轮为例,该测量系统主要由光电自准直仪、多通道数据记录系统、反射镜组件、多通道双晶单色器及其控制系统组成,如图4所示。准直光束从光电自准直仪射出,依次经过一晶、二晶,射向反射镜组件,经反射镜反射后,再次经过二晶、一晶返回自准直仪。双晶之间的不平行度经光路放大,然后由自准直仪检测并显示在CCD屏幕上。位置域控制器实时接收上位机命令,将步进运动指令序列发送至双轴电机驱动器,电机受控产生步进运行,双轴位置信息由高精度编码器反馈,多通道数据记录系统实时记录实验数据。

测量流程如图5所示,首先,光电自准直仪放置在单色器系统入射光线处,反射镜组件安装在出射光线处。准直光束从自准直仪射出,调整反射镜组件与自准直仪物镜的平行度,直至CCD

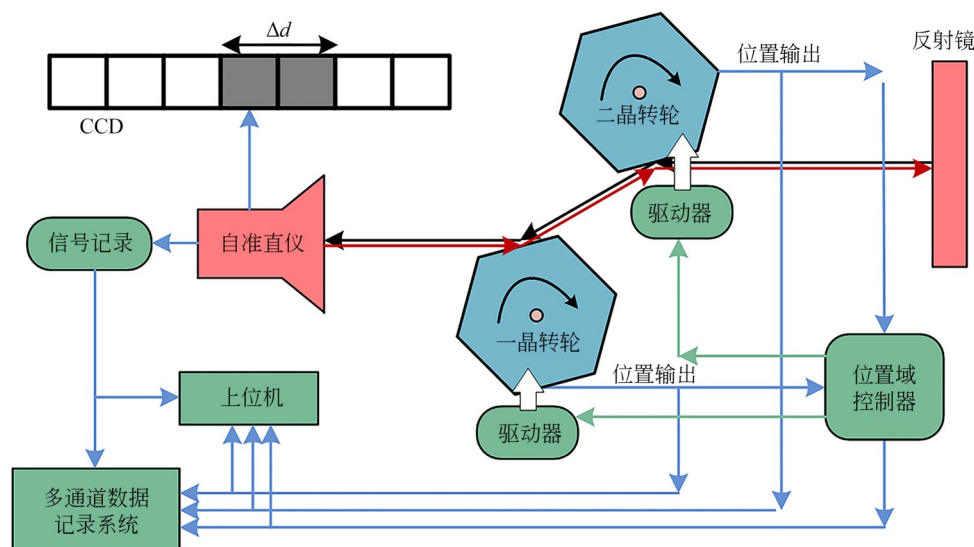


图 4 平行度误差测量系统组成

Fig. 4 Composition of parallelism error calibration system

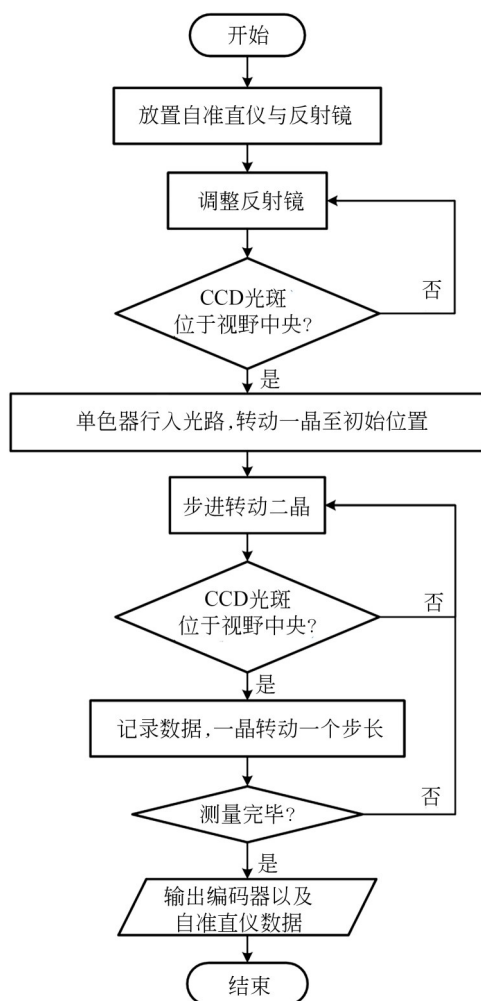


图 5 平行度误差测量流程

Fig. 5 Flowchart of parallelism error calibration

光斑位于相机视野中央。此时, 自准直仪物镜与反射镜组件已经实现高精度平行对准, 完成设备的初始标定。

然后, 将多通道双晶单色器置于自准直仪与反射镜之间, 使其插入光路。主轴驱动选定晶片旋转至初始测量位置并固定, 随后旋转从轴带动相应晶片, 直至 CCD 相机视野中出现待测光斑。继续旋转从轴, 直至光斑最接近视野中心, 此时认为一晶和二晶上的对应晶片已实现高精度平行对准, 同时记录主轴和从轴的位置。从此位置开始, 给定一个不低于指标要求的最小步长。每次主轴转动一个步长后固定, 然后再使从轴按照相同方向缓慢转动若干步长, 直至光斑接近视野中心, 再次实现高精度平行对准。主轴和从轴依次移动若干步长, 记录自准直仪和编码器数据, 直至完成一组晶片的测量。

最后, 相对于初始位置将主轴旋转 60° , 达到下一对晶片的测量位置。重复以上操作, 直至完成整圈一、二晶对应晶片的准静态平行度测量。此处提及的“准静态”与下文所提的“动态”相对应, 指的是在读取编码器及自准直仪数据时, 系统是静态的; 但整个测量过程中, 系统又是缓慢步进运动的, 且主从轴相对位置“基本保持不变”, 因此定义为“准静态”。

4 从轴运动轨迹规划

4.1 运动特点分析

由于一、二晶对应晶片间均存在初始角度偏差,主、从轴单纯匀速转动无法保证单色器通道的平行度。因此,需要在每次切换单色器通道时及时调控主、从轴的相对位置,以补偿平行度误差。主轴保持匀速运动,从轴在同步匀速运动的基础上配合主轴,在每次切换单色器通道时进行微调,始终保持单色器通道在工作区间内的动态平行度。只要获得各组晶体之间的平行度误差测量信息,就能据此规划从轴相对主轴的运动轨迹。

图6为轨迹规划策略。图中实线表示主轴匀速轨迹,虚线表示一、二晶对应晶片间的平行度误差,即从轴相对主轴的角度差,为补偿该角度差,从轴在相邻单色器通道切换过程中存在明显的角度跳变,易引起系统振荡。因此,需要合理规划从轴的运动轨迹,使轨迹充分平滑,尽量减少冲击。图中阴影部分为每个单色器通道的工作区间(约 1°),只需在该区间内保持高精度平行对准,而其余角度范围用于从轴的动态调整,这给运动轨迹规划留有空间。只要在工作区间前,调整从轴轨迹补偿平行度误差,就能保证光谱扫描质量。曲线表示利用S形曲线规划后的从轴运动轨迹,该轨迹在相邻工作区间之间平滑过渡,补偿平行度误差。

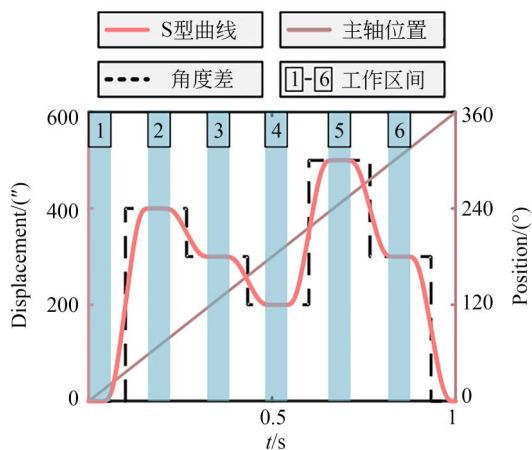


图6 轨迹规划策略

Fig. 6 Strategy of trajectory planning

4.2 S形曲线轨迹规划算法

在由不同晶体对形成单色器通道时,主轴作匀速运动,从轴需配合主轴作高精度的点对点运动,以补偿初始角度偏差带来的平行度误差,因此从轴轨迹的规划精度与性能至关重要。

S形曲线是基于“加速-匀速-减速”对称式设计思想的轨迹规划方法,能获得加速度连续的平滑轨迹,广泛应用于实际工程中。但3阶S形曲线的加加速度(J)不连续,容易引起冲击和振荡,在对轨迹精度要求较高的应用场合中,往往采用加加速度连续的4阶或更高阶S形曲线^[18]。当前的S形曲线轨迹规划算法缺乏对实际物理系统动力学约束的考察,无加速度、加加速度等约束参数设置可能导致系统的运动性能无法达到预期,从而引起轨迹规划运动滞后。因此,针对实际物理系统的动力学约束限制设计S形曲线的轨迹规划方法具有重要价值。

图7所示为4阶S形曲线轨迹的典型轮廓。其中, $X_{\max}$ 表示总位移, $V_{\max}$ 表示最大速度限制, $A_{\max}$ 表示最大加速度限制, $J_{\max}$ 表示最大加加速度限制, $S_{\max}$ 表示最大加加加速度限制。4阶S形

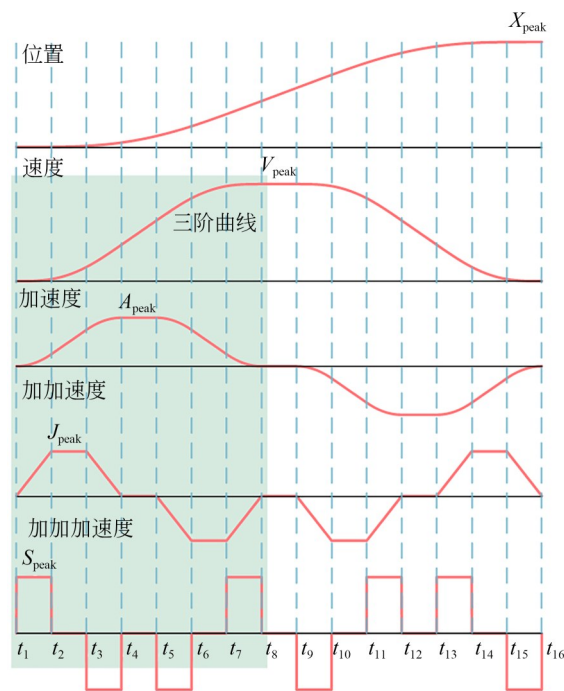


图7 四阶S形曲线轨迹

Fig. 7 Four-order S-curve trajectory

曲线可表示成 3 阶 S 形曲线的分形对称形式:

$$L_4 = \begin{cases} L_3, t_1 < t < t_8 \\ 0, t_8 < t < t_9 \\ -L_3, t_9 < t < t_{16} \end{cases} \quad (5)$$

观察 3 阶和 4 阶 S 形曲线的各阶导数可知, 4 阶 S 曲线可看作 3 阶 S 形曲线在各阶导数降阶后分别作奇、偶对称的结果; 从 3 阶变化到 4 阶时, 加加速度由阶跃形式变为梯形, 加速度则由梯形变成平滑 S 形曲线, 轨迹的总体平滑性得到提升, 分段数也从 7 段增加到 15 段。

同理, n 阶 S 形曲线可以表示为由 $2^n - 1$ 段曲线组成的形式:

$$L_n = \begin{cases} L_{n-1}, t_1 < t < t_{2^{n-1}} \\ 0, t_{2^{n-1}} < t < t_{2^n+1} \\ -L_{n-1}, t_{2^n+1} < t < t_{2^n} \end{cases} \quad (6)$$

n 阶 S 形曲线的最高阶导数(第 n 阶导数)呈阶跃形式, 曲线阶数的提升可看作其最高阶导数平滑性、连续性提升的结果。从 n 阶 S 形曲线变化到 $n+1$ 阶, 其 n 阶导数由阶跃形式上升为梯形, 上升沿、下降沿分别演化为左斜边、右斜边, 曲线的分段数也因此增加。对导数进行多次积分, 就可以得到速度和位置曲线。因此, 只要确定 n 阶 S 形曲线的最高阶导数的分布, 就能完全确定该 n 阶 S 形曲线。

用 X_n^{peak} 表示 n 阶 S 曲线第 n 阶导数的峰值, X_k^{peak} 表示第 k 阶导数的峰值, T_k 表示 X_k^{peak} 的持续时间。根据 S 形曲线的对称性, 第 k 阶导数的峰值可由第 $k+1$ 阶导数的类梯形曲线与 x 轴围成的面积得到, 则第 $n-1$ 阶导数的峰值与第 n 阶导数峰值的关系为:

$$X_{n-1}^{\text{peak}} = \frac{X_n^{\text{peak}}}{2} (t_2 - t_1 + T_n). \quad (7)$$

第 k 阶导数的峰值与第 $k+1$ 阶导数、第 n 阶导数的峰值的关系为:

$$X_k^{\text{peak}} = \frac{X_{k+1}^{\text{peak}}}{2} \left[\left(\sum_{j=0}^{n-k-1} 2^j T_{k+1+j} \right) + T_{k+1} \right] = \frac{X_n^{\text{peak}}}{2^{n-k}} \prod_{i=1}^{n-k} \left[\left(\sum_{j=0}^{i-1} 2^j T_{n+1-i+j} \right) + T_{n+1-i} \right]. \quad (8)$$

则其位置阶曲线(第 0 阶导数)的峰值与第 n 阶导数的关系为:

$$X_0^{\text{peak}} = \frac{X_n^{\text{peak}}}{2^n} \prod_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=0}^{i-1} 2^j T_{n+1-i+j} \right) + T_{n+1-i} \right]. \quad (9)$$

至此, 可完成 n 阶 S 形曲线各阶峰值的求解。

使用 S 形曲线对多通道双晶单色器进行轨迹规划, 前提条件如下:

(1) 实际物理系统的动力学约束条件如表 1 所示, 通常速度及加速度的物理意义较为明显, 可结合系统设计参数进行设定, 而高阶的加加速度及加加加速度选取合适范围即可。本文参考相关论文^[14,19]的数据结果并结合系统参数计算得到适当取值, 各运动参量如表 1 所示。

表 1 实际物理系统动力学约束参数

Tab. 1 Dynamic constraint parameters of actual physical system

运动参量	备 注
最大速度 $V_{\max}$	由电机额定转速决定
最大加速度 $A_{\max}$	由电机额定转矩及负载惯量决定
最大加加速度 $J_{\max}$	由电机驱动器电流环响应时间确定
最大加加加速度 $S_{\max}$	由参考值确定 ^[14,19]
其他高阶量	不设定最大值限制

(2) 相邻单色器通道切换时的切换时间设定为 T_{sw} , 其具体数值与平行度的测量结果及主轴的基准转动速度相关。

基于上述给定条件, 多通道双晶单色器 S 形曲线轨迹规划的算法步骤如图 8 所示。

4.2.1 初始化参数

目标位置 X_d , 轨迹的终点, 表示相邻单色器通道之间的初始角度偏差, 由平行度测量结果得到; 运动时间 T_{sw} , 即相邻单色器通道之间设定的切换时间, 从轴需要在此时间之内运动到轨迹终点; 动力学约束条件 $[V_{\max}, A_{\max}, J_{\max}, S_{\max}]$, 从轴在运动时各阶运动量的限制, 由电机性能参数决定。

4.2.2 各阶导数峰值时间的初始值设定

不考虑系统的动力学约束条件, 各阶导数峰值的持续时间初始值如下:

$$T_k = \frac{T_{\text{sw}}}{2^n - 1}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

求解结果作为初始条件参与后续优化调整。

4.2.3 各阶参量峰值时间优化

从速度量开始, 根据式(8)计算当前运动参量峰值, 并与初始设置的动力学约束条件进行比较。若参量峰值大于约束最大值, 则将最大值赋

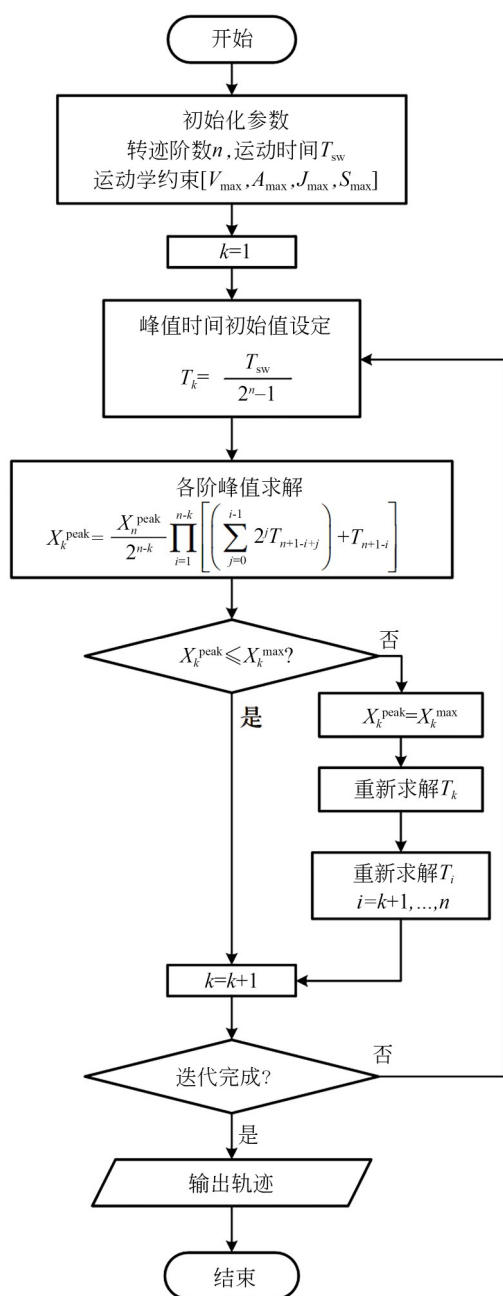


图8 S形曲线轨迹规划算法流程

Fig. 8 Flow chart of S-curve trajectory planning algorithm

给峰值,并通过式(8)重新求解峰值时间;若参量峰值小于约束最大值,则进入下一阶参量的优化阶段。

随着曲线阶数的增加,运动约束条件增多,算法结构复杂且计算量显著增加,但是阶数过高对电机实际运动的平滑性改善有限,而且会导致明显的规划滞后现象。因此,在实际使用时,S形曲线轨迹规划算法通常不超过5阶^[20]。

基于上述步骤,就能完全确定S形曲线轨迹规划的各阶参量的特征时间,规划出完整的平滑轨迹,并且充分考虑实际物理系统的动力学约束条件,因此,可以作为多通道双晶单色器从轴运动轨迹的一种有效实施方案。

5 实验

5.1 实验平台搭建

针对提出的准静态平行度测量系统,基于实验室的现有条件搭建了样机实验平台,实验重点在于平行度测量方案与轨迹性能验证,实验平台的机械结构在真实双晶单色器系统的基础上进行适当简化,不考虑真空、水冷等相关结构。整体样机的实验平台组成及硬件选型如图9及表2所示,包括安川交流伺服电机及驱动器、海德汉28位高精度编码器、机加工转轮和dSPACE控制器等。数据采集程序及运动控制算法在包含MATLAB/Simulink开发环境的上位机中完成,并在dSPACE-MicroLabBox中实时部署运行,控制单色器运动并采集数据。平行度检测设备采用德国Moller公司Elcomat 3000高精度光电自准直仪,其标称精度为0.1"。系统误差来源

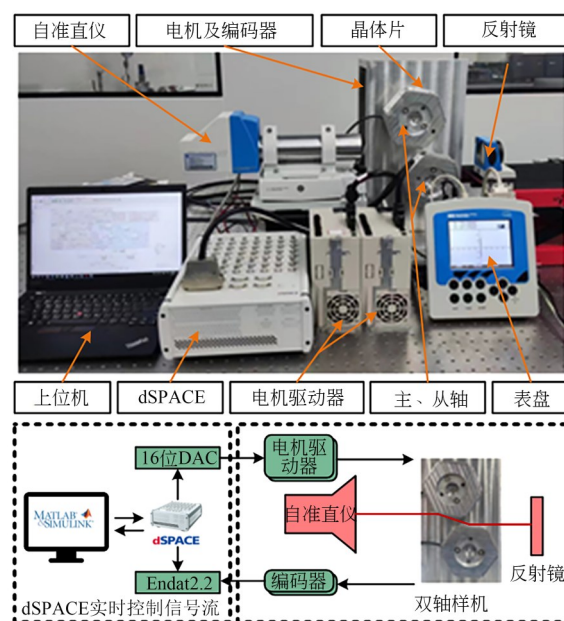


图9 多通道双晶单色器实验平台

Fig. 9 Experimental platform of multi-channel monochromator

表 2 实验平台硬件选型

Tab. 2 Hardware selection of experimental platform

硬 件	型 号	功 能
安川驱动器	SGDS-120A	电机驱动
安川直驱电机	SGM7D-08G	转轮动力
海德汉编码器	RCN 5581	位置反馈
dSPACE控制器	MicroLabBox	算法部署
MATLAB上位机	R2017a	算法设计
光电自准直仪	Elcomat 3000	光路测试

如下^[21]:

- (1)自准直仪精度 $\epsilon_1 = 0.1''$;
- (2)反射镜面形误差,所选用的反射镜面形精度为 $\lambda/10@633\text{ nm}$,长度为 60 mm,当测量偏离 1 mm 时,反射镜面形引起的误差 $\epsilon_2 = 0.01''$;
- (3)环境温度扰动,光电自准直仪精度随温度变化的线性关系约为 $0.1''/^{\circ}\text{C}$,实验室的温度变化控制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/60\text{ min}$,则环境温度扰动误差 $\epsilon_3 = 0.05''$;
- (4)自准直仪稳定性误差,通过固定仪器、控制人员流动等措施尽量减小误差,则 $\epsilon_4 = 0.1''$;

综上所述,基于自准直仪的测量系统合成误差 $\epsilon = \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 + \epsilon_4^2} = 0.15''$,满足测试要求。

为测试样机平台双晶平行度分辨率,在从轴晶片的工作区间内,以不低于指标要求的步长正反方向各行十步,记录自准直仪读数,每步采样 100 s,结果如图 10 所示。系统的平行度分辨率在 $0.5''$ 左右,满足平行度测量要求。

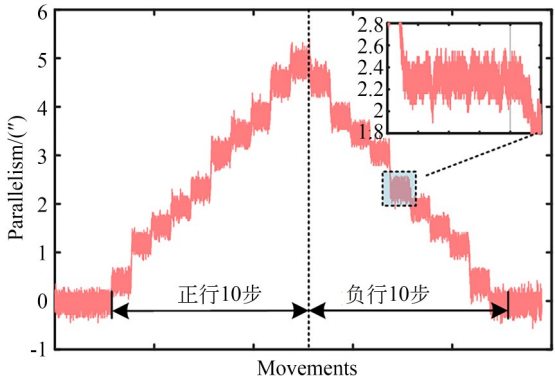


图 10 平行度分辨率测试结果
Fig. 10 Motion resolution test results

5.2 准静态平行度测量实验

多通道双晶单色器准静态平行度测量实验在武汉光源预研基地的光束线实验大厅内进行,实验室温度设置在 $(25 \pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温控制。测试过程中,主、从轴电机使用驱动器位置控制模式进行步进运动,编码器数据采用全程开环测试。

平行度测量时,首先安装自准直仪并准直光路。晶体插入光路后,需要找到每对晶体的初始测量位置。主轴转轮在出光范围内,以 $1\text{ }000''$ 的增量步进转动,每次转动完毕后固定主轴角度,从轴以 $300''$ 的增量连续转动调节,直至观察到出光现象;此时再以 $0.5''$ 的增量进行微调,直至自准直仪 CCD 光斑最接近视野中央,即为当前条件下的最优平行位置。从此位置开始,主从轴同时以 $300''$ 的增量反转,从轴在此过程中随时微调保持双晶平行状态,直至 CCD 光斑消失,即为测量初始位置。从此位置开始,利用如图 5 所示的测量流程对六面晶体进行正转、反转测量,结果如表 3 所示。

表 3 六对晶体的平行度测量结果

Tab. 3 Parallelism calibration results of six pairs ($''$)

晶片	点位	主轴角度	从轴角度	平均差值
1	起点	678 603.7	679 604.6	-1 003.5
	终点	690 203.6	691 214.2	
2	起点	678 603.8	679 604.8	-1 107.2
	终点	894 603.8	895 718.4	
3	起点	906 401.1	907 502.3	-977.0
	终点	894 603.9	895 717.4	
4	起点	1 110 935.2	1 111 917.4	-1 029.1
	终点	1 118 437.2	1 119 409.7	
5	起点	1 110 936.3	1 111 918.6	-1 117.5
	终点	31 338.3	32 364.7	
6	起点	42 438.4	43 475.8	-969.0
	终点	251 445.1	252 553.4	
	起点	31 340.2	32 366.5	
	终点	258 345.3	259 467.8	
	起点	251 446.1	252 554.3	
	终点	462 646.2	463 610.2	
	起点	474 346.2	475 322.4	
	终点	462 646.8	463 611.0	

由结果可知,主、从轴的初始角度偏差在千角秒量级,而相邻两组晶体之间的角度跃迁差值在百角秒量级,即为从轴运动轨迹每次需要补偿的平行度误差。主轴转动周期内,各对晶体测量结果的放大图如图 11 所示。

由图 11 可知,每对晶片的实际出光范围在 3°左右,且在出光范围内主从轴的位置差值呈单调变化,在 3°内变化 10″左右,该变化来源于人工贴在滚角方向上的影响以及主、从转轴同轴度的影响。

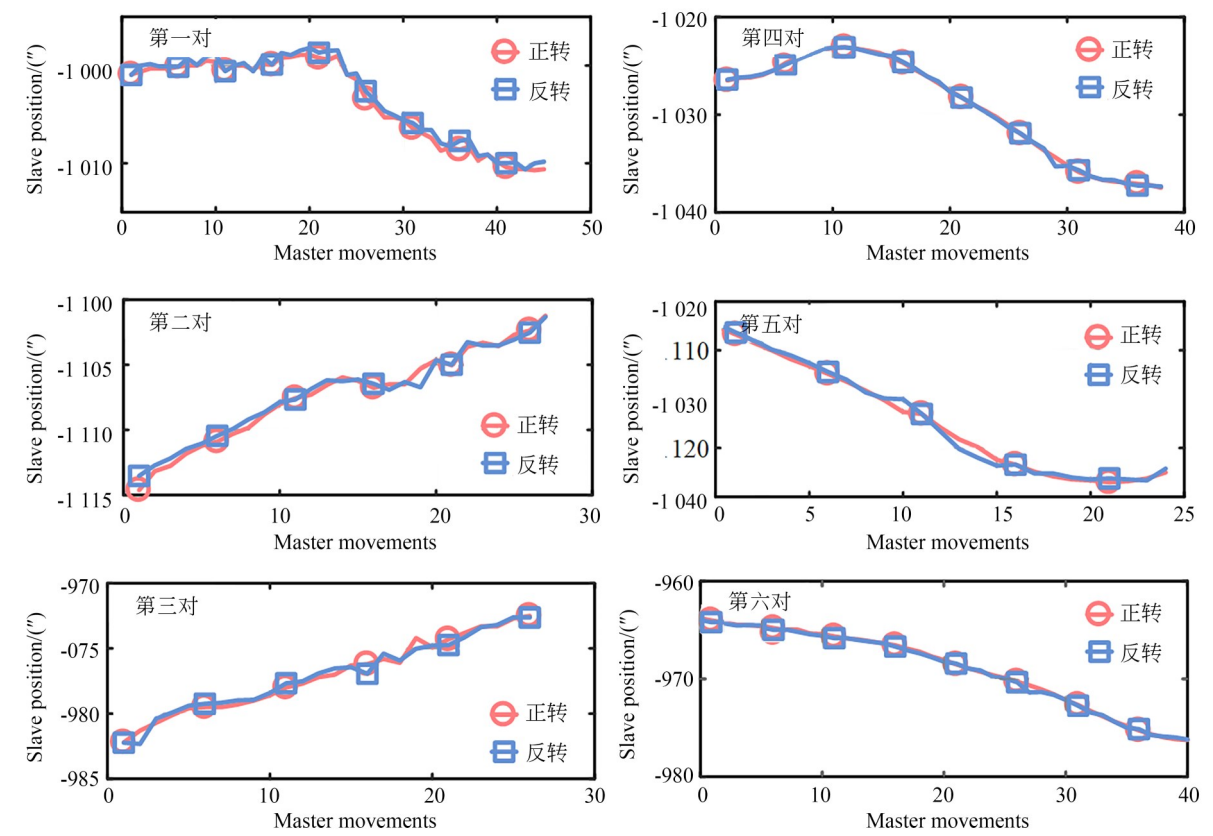


图 11 六对晶体的平行度测量结果
Fig. 11 Parallelism calibration curves of six pairs

5.3 运动轨迹跟踪实验

基于准静态平行度测量结果,结合 S 形曲线轨迹规划算法,可针对不同转速情况下的主、从轴相对运动轨迹进行规划,各段轨迹的持续时间由晶片数目及主轴基础转速决定。

由于不同转速下轨迹规划结果形式接近,以 1 rad/s 的转速为代表工况,其轨迹参数如表 4 所示,整周运动轨迹如图 12 所示。其中,将第一组晶体的初始角度偏差作为轨迹开始的基准值(0″),轨迹规划针对相邻两组晶体之间的角度跃迁差值。

此曲线即为多通道双晶单色器系统运行时,从轴控制部分的周期参考输入。使用文献[3]所

表 4 轨迹参数

Tab. 4 Trajectory parameter			
参数	取值	参数	取值
轨迹阶数	4	P_1	0″
切换时间	0.138	P_2	−103.7″
工作时间	0.028	P_3	26.5″
$V_{\max}/((^{\circ})\cdot s^{-1})$	12	P_4	−25.6″
$A_{\max}/((^{\circ})\cdot s^{-2})$	30	P_5	−114″
$J_{\max}/((^{\circ})\cdot s^{-3})$	3 000	P_6	−34.5″
$S_{\max}/((^{\circ})\cdot s^{-4})$	7×10^5		

提迭代学习模型预测控制算法对主从轴进行运动控制,设置电机转速从 0.5~2 rad/s 的不同工况,并分别跟踪 S 形曲线规划轨迹、5 阶多项式曲

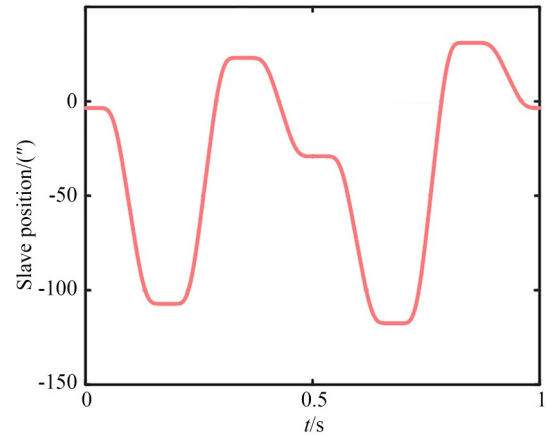


图 12 S形曲线轨迹规划结果
Fig. 12 S-curve trajectory planning results

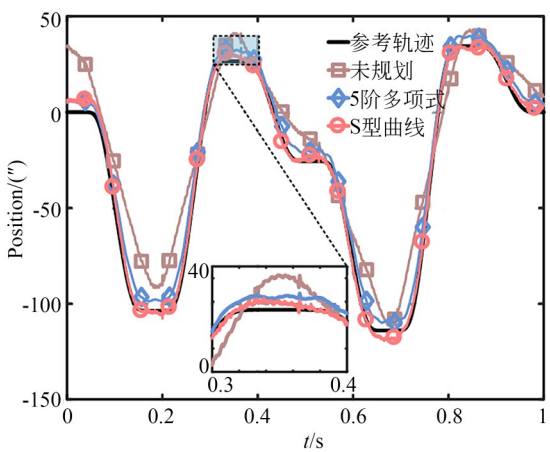


图 13 S形曲线轨迹跟踪结果
Fig. 13 S-curve trajectory tracking results

线轨迹与未规划轨迹,以验证所提轨迹规划算法的性能。表 5 为不同工况下不同轨迹跟踪的误差有效值与最大值的统计结果。1 rad/s 工况下从轴的轨迹跟踪结果如图 13 所示。

由实验结果可知,在 1 rad/s 跟踪实验中,S 形曲线收敛的误差为 6.1",相比于 5 阶多项式及未规划轨迹,其轨迹跟踪误差分别降低了 58.7% 和 63.9%。由此表明,所提的 S 形曲线轨迹规划算法能够显著提升从轴轨迹的跟踪性能,实现更高精度的平行度误差补偿效果。

图 14 为补偿前三组晶体平行度误差下,馈入单色器从轴电机的控制量输入信号变化曲线,对比 5 阶多项式曲线及未规划曲线,S 形曲线轨迹的系统控制量输入信号过渡更加平滑,控制量曲线的突变及“毛刺”更少。实验结果表明,在 S 形曲线轨迹的作用下,系统冲击得到有

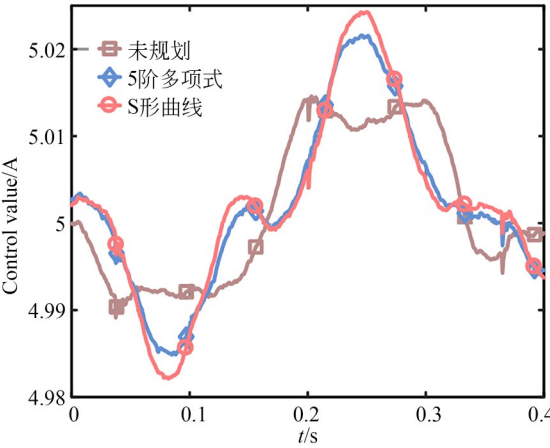


图 14 馈入从轴电机的控制量
Fig. 14 Control value fed into slave motor

效降低,有利于系统的平稳运行以及精度的提升。

表 5 轨迹跟踪实验结果

Tab. 5 Trajectory tracking experimental results

(")

转速/(rad·s ⁻¹)	均方根误差			最大值误差		
	S 形曲线	多项式曲线	未规划曲线	S 形曲线	多项式曲线	未规划曲线
0.5	5.80	7.4	9.7	12.6	19.2	16.0
1.0	6.10	15.8	16.9	15.8	27.5	47.2
1.5	9.18	24.3	28.4	39.2	65.9	83.8
2.0	16.90	35.2	55.3	59.3	105.6	139.6

6 结 论

本文结合多通道双晶单色器的工作原理及

平行度误差测量及补偿需求,提出了基于光电自准直仪的平行度误差测量系统,以及考虑实际物理系统动力学约束的 S 形曲线轨迹规划算法,并

搭建了双轴运动实验平台以验证所提方法有效性。实验结果表明,所搭建的实验平台的平行度测量精度在 $0.5''$,主、从轴初始角度偏差在千角秒量级,相邻两组晶体之间角度跃迁差值在百角秒量级。所提 S 形曲线轨迹规划算法能够有效补偿平行度误差,降低系统冲击,有利于控制精

度的提升。在 1 rad/s 的工况下,该轨迹的跟踪误差有效值能够降低到 $6.1''$,相比传统 5 阶多项式曲线轨迹及未规划轨迹,跟踪误差分别降低了 58.7% 和 63.9%。实验结果充分验证了所提测量方案及运动轨迹规划算法对补偿多通道双晶单色器平行度误差的有效性。

参考文献:

- [1] ZHAO X J, ZHAO Y D, ZHENG L, *et al.* Optical design and optimization study of metrology sector at high energy photon source[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2021, 5 (2): 174-180.
- [2] NEWVILLE M. Fundamentals of xafs [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2014, 78 (1): 33-74.
- [3] WU J X, GONG X P, SONG Y, *et al.* Improvement of the performance of a cryo-cooled monochromator at SSRF. Part II: angular stability of the exit beam[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 988: 164872.
- [4] 赵相国. 同步辐射单色器晶体热缓释技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
ZHAO X G. *Study on Thermal Slow Release Technology of Synchrotron Radiation Monochromator Crystal* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [5] 朱晔, 张小威, 石泓, 等. 一种快扫 X 射线吸收精细结构谱学单色器: CN112748136B [P]. 2022-04-01.
ZHU Y, ZHANG X W, SHI H, *et al.*. A fast scanning X-ray absorption fine structure spectroscopy monochromator: CN112748136A [P]. 2022-04-01. (in Chinese)
- [6] 何思宇, 鲁浩林, 冯朝, 等. 基于平行度误差补偿的多通道双晶单色器运动控制[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(9): 1335-1346.
HE S Y, LU H L, FENG ZH, *et al.* Motion control of multi-channel double crystal monochromator based on parallelism error compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1335-1346. (in Chinese)
- [7] 刘石磊, 王丽, 徐中民, 等. 同步辐射双晶单色器平行度测量方法研究[J]. *核技术*, 2011, 34(6): 411-414.
LIU S L, WANG L, XU ZH M, *et al.* A new method to measure the parallelism error of synchrotron radiation from double-crystal monochromator [J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34(6): 411-414. (in Chinese)
- [8] FAN Y C, QIN H L, ZHU W Q, *et al.* Angular stability measurement of a cryocooled double-crystal monochromator at SSRF [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 983: 164636.
- [9] WU J X, GONG X P, SONG Y, *et al.* Improvement of the performance of a cryo-cooled monochromator at SSRF. Part I: double-crystal parallelism [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 985: 164654.
- [10] LIM J, RAH S. Measurement of the parallelism error of a double crystal monochromator by the pencil beam interferometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(6).
- [11] 李龙辉, 张芷齐, 郭振, 等. 柔性扫描平台最优阶多项式速度曲线控制[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2400-2411.
LI L H, ZHANG ZH Q, GUO ZH, *et al.* Optimal order polynomial motion profile for high-precision flexible scanning platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2400-2411. (in Chinese)
- [12] 龙樟, 李显涛, 帅涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述[J]. *机械科学与技术*, 2021, 40(6): 853-862.
LONG ZH, LI X T, SHUAI T, *et al.* Review of research state of trajectory planning for industrial robots [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, 40 (6): 853-862.

- (in Chinese)
- [13] 穆海华, 周云飞, 周艳红. 步进扫描光刻机扫描运动轨迹规划及误差控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 166-171.
- MU H H, ZHOU Y F, ZHOU Y H. Trajectory planning and precision control of scan-move for step-scan lithography stage[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 166-171. (in Chinese)
- [14] 李爱琳, 李璟. 纳米级运动轨迹规划和控制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(17): 2534-2545.
- LI A L, LI J. Trajectory planning scheme for ultra-precision system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(17): 2534-2545. (in Chinese)
- [15] FANG Y, HU J, LIU W H, *et al.* Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated robots and machines [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 137: 127-153.
- [16] 祁超, 谢馨, 陈凌宇, 等. 精密转台 S 曲线轨迹规划及高精度控制[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2971-2981.
- QI CH, XIE X, CHEN L Y, *et al.* S-curve trajectory planning and high-precision control of precision servo turntable [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 2971-2981. (in Chinese)
- [17] LU H L, HE S Y, FENG Z, *et al.* High precision fixed time 4-order S-curve trajectory planning for multi-channel double crystal monochromator [C]. 2023 *International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. July 8-10, 2023. Sanya, China. IEEE, 2023: 786-791.
- [18] BIAGIOTTI L, MELCHIORRI C. Optimization of generalized S-curve trajectories for residual vibration suppression and compliance with kinematic bounds[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(5): 2724-2734.
- [19] LAMBRECHTS P, BOERLAGE M, STEINBUCH M. Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13 (2) : 145-157.
- [20] ACHARYA P, NGUYEN K D, LA H M, *et al.* Nonprehensile manipulation: a trajectory-planning perspective [J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2020: 1.
- [21] 樊奕辰. 液氮冷却双晶单色器稳定性测试技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2020.
- FAN Y CH. *Study on Stability Testing Technology of Liquid Nitrogen Cooled Double Crystal Monochromator*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)

作者简介:



鲁浩林(2001—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,2022年于武汉大学获得学士学位,主要研究方向为单色器运动控制。E-mail: luhaolin@whu.edu.cn

通讯作者:



肖晓晖(1969—),女,湖南益阳人,教授,博士生导师,1991年、1998年于武汉大学分别获得学士和硕士学位,2005年于华中科技大学获得博士学位,主要研究方向为微/纳米机器人运动控制。E-mail: xhxiao@whu.edu.cn