

文章编号 1004-924X(2023)09-1335-12

## 基于平行度误差补偿的多通道双晶单色器 运动控制

何思宇, 鲁浩林, 冯朝, 肖晓晖\*  
(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**针对新型多通道双晶单色器系统易受晶体片平行度误差影响导致性能失效的问题,提出一种迭代学习模型预测控制器(Iterative Learning Model Predictive Control, ILMPC)策略。该策略将主-从轴晶体片平行度误差转换为从轴电机的重复参考运动轨迹,采用 ILC 迭代消除周期性机械安装误差,再利用 MPC 对单个转动周期内从轴电机的随机性误差进行抑制。最终在单轴电机运动实验平台上对该策略进行轨迹跟踪验证。实验结果表明,在晶体片有效工作区间内从轴电机的位置跟踪误差达到 1.44", 相比于 PID 控制、MPC、DOB+MPC 以及 ILC+PID 组合控制器策略,分别降低了 99.64%, 98.52%, 98.26% 和 73.33%。研究结果验证了所提出的 ILMPC 策略在补偿晶体片平行度误差和提高平行对准精度方面的有效性,该策略对于改善新型多通道双晶单色器性能具有较好的实际应用价值。

**关键词:**运动控制;迭代学习控制;模型预测控制;多通道双晶单色器

**中图分类号:** TP249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233109.1335

## Motion control of multi-channel double crystal monochromator based on parallelism error compensation

HE Siyu, LU Haolin, FENG Zhao, XIAO Xiaohui\*

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

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

**Abstract:** This paper proposes a control strategy to address the issue of crystal parallelism errors that affect the performance of the new multi-channel double-crystal monochromator (DCM) system. The control strategy integrates iterative learning control (ILC) and model predictive control (MPC) to reduce random position errors of the slave motor and eliminate repetitive mechanical installation errors, respectively. The parallelism errors between the master and slave crystals are converted into the repetitive reference motion trajectory of the slave motor, and the MPC is used to improve the slave motor position tracking within a single rotation cycle. Meanwhile, ILC iterations are applied during rotation cycles to eliminate repetitive mechanical installation errors. The proposed control strategy is verified using a single-axis motor motion experimental platform. Experimental results demonstrate that the motor position tracking error reaches 1.44" - reduction by 99.64%, 98.52%, 98.26%, and 73.33% as compared to the errors of PID, MPC, DOB+MPC, and ILC+PID combination controller strategies, respectively. The proposed con-

收稿日期:2022-12-31;修订日期:2023-02-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375349)

trol strategy effectively compensates for crystal parallelism errors and improves parallel alignment accuracy, providing practical application value for the performance enhancement of the new multi-channel DCM system.

**Key words:** motion control; iterative learning control; model prediction control; multi-channel double crystal monochromator

## 1 引言

基于时间分辨的 X 射线吸收精细结构谱学 (X-ray Absorption Fine Structure, XAFS) 实验方法是同步辐射光源领域一种重要的技术手段, 广泛应用于生命、材料科学等领域材料的实时结构研究中<sup>[1-3]</sup>。双晶单色器是 XAFS 系统中承担单色化入射光功能的核心部件, 通常由一对相互平行的 Si 晶片组成, 通过在某一设定角度位置的快速往复转动, 实现连续光谱的输出<sup>[4-8]</sup>。单色器光谱输出频率的提升有助于实时反映物质结构内在的变化过程, 但采谱频率的提升往往伴随晶体片平行角度误差的增大, 从而导致光源输出强度降低甚至失效, 因此在采谱频率提升的同时减小晶体片平行角度误差是单色器性能提升的关键。

基于分离式反射晶体设计的传统单通道双晶单色器在实际使用过程中, 存在机械结构回程间隙、晶体表面温度集中等问题, 导致第一、二晶体平面间平行度误差增大, 可造成单色光源输出强度减弱甚至失效, 因此通常会限制晶体转动速度, 以满足单色器的长期运行与稳定输出<sup>[7,9-11]</sup>。针对上述问题, 张小威等提出了连续转动型多通道双晶单色器的结构方案, 该结构将晶体片贴装于两块多面体棱柱上并分别由主、从转轴直驱驱动, 主、从轴对应晶体片在电机运动过程中实现晶体片的平行对准<sup>[12]</sup>。相比于传统单通道双晶单色器, 多通道双晶单色器系统的扫描频率可随着旋转速度以及转轴晶面数的增加而进一步提高。但由于晶片贴装、系统结构加工与组装带来的安装误差难以避免, 当控制主轴以恒定速度转动时, 上述系统的安装误差会作为从轴位置跟踪误差在每个电机转动周期性重复出现, 因此对从轴位置跟踪误差的周期性补偿是实现该结构方案的关键。

针对多通道双晶单色器从轴的重复性位置误差的补偿问题, 可通过每个电机旋转周期对从轴转动进行重复性控制, 以实现电机转动过程中

晶体片平行对准的控制目标。迭代学习控制 (Iterative Learning Control, ILC) 是一种能够有效补偿重复性误差的前馈控制方法<sup>[13-14]</sup>。在每个电机转动周期, ILC 会利用上一转动周期的位置误差计算生成当前周期的电机控制信号序列, 使电机的位置跟踪误差随迭代次数的增加逐渐收敛到稳定状态。然而, 双晶单色器在工作过程中可能受到环境温度变化以及冷却液流动等随机扰动的影响, ILC 对上述非重复性干扰的控制效果有限, 甚至可能导致迭代过程中跟踪误差值发散<sup>[15]</sup>。

为抑制非重复性干扰对 ILC 迭代的影响, 采用 ILC 与反馈控制器相结合的方式实现从轴电机的高精度运动控制。PID 控制广泛应用于电机运动控制系统, 但 PID 控制器存在相位延迟特性, 限制了电机位置跟踪的精度与速度<sup>[16-17]</sup>。文献 [18-19] 提出结合迭代学习与滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC) 的控制策略, 用于永磁直线同步电机的运动控制, 该算法跟踪精度高、稳定性强, 但电机易出现抖振现象, 同时当系统为高阶模型时, 滑模控制器设计困难且控制量受噪声影响较大, 控制效果受限。模型预测控制器 (Model Predictive Control, MPC) 在每个控制周期利用系统模型与当前状态反馈信息预测未来一段时间内系统的输出, 借助优化算法来计算这段时间的开环最优控制序列, 当系统对象辨识良好时, MPC 具有良好的控制性能, 且不受高阶模型的影响<sup>[20-21]</sup>。

文献 [22] 分析了 ILC 与 MPC 结合的整体式迭代学习模型预测控制器 (Iterative Learning Model Predictive Control, ILMPC) 的性能, 结果表明 ILC 与 MPC 结合不仅可以保留 ILC 跟踪重复性轨迹的能力, 还由于 MPC 控制器良好的闭环跟踪性能, 系统的轨迹跟踪精度能得到进一步提升。然而, 该方法使用串联形式的频域 ILC, 其稳定性取决于包括被控对象、MPC 与卡尔曼滤波器的频域不确定性, 因此参数整定过于繁

琐,且学习效率和收敛速度难以保证。

综上,晶片平行度误差补偿是实现多通道双晶单色器正常工作的关键条件。考虑晶片安装误差在单色器工作过程中周期性重复出现的特点,提出了结合 ILC 和 MPC 的前馈-反馈两段式控制策略,通过将晶体片位置安装误差转换为从轴电机的重复参考运动轨迹,利用 MPC 实现从轴电机单个转动周期内电机位置误差的有效抑制,并借助 ILC 的迭代消除电机重复性运动误差,进一步提升从轴电机位置跟踪精度,以实现晶片在转动过程中的高精度平行对准;最后,搭建了单轴电机运动实验平台,以验证所设计控制器的有效性。

## 2 新型多通道双晶单色器系统

### 2.1 工作原理

多通道双晶单色器系统如图 1 所示,该系统由多面体转轴、真空腔、磁流体密封装置、编码器、伺服电机以及光学隔振台等组成。在单色器工作过程中,同步辐射光源储能环出射的白光由光源入射口注入真空腔内,当主、从轴转动至工作区间角度(约 $1^\circ$ )时,主、从转轴上对应的晶体片可实现一组动态平行衍射面,如图 2 所示。依据布拉格衍射原理,入射光经主晶体衍射后,只有波长满足布拉格衍射方程(式(1))的单色光源可以在晶体面衍射,并通过与第一晶体平行的第二晶体再次衍射,由光源出射口输出连续频率变化的单色光,最后进入电离室完成后续样品采样。

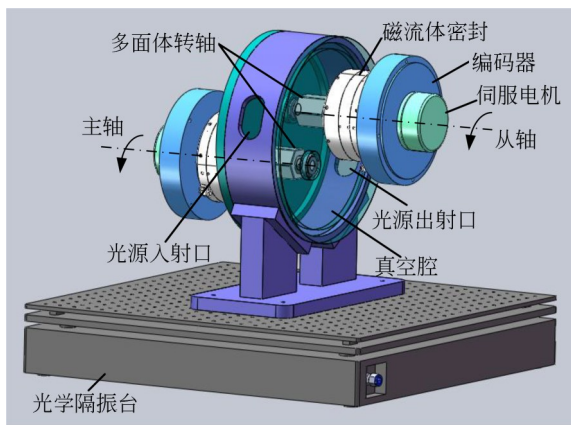


图 1 多通道双晶单色器系统

Fig. 1 Schematic diagram of multi-channel DCM system

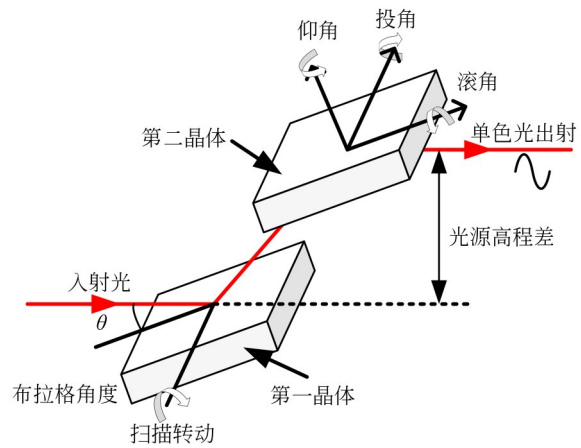


图 2 双晶单色器的工作原理

Fig. 2 Working principle of double crystal monochromator

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (1)$$

式中: $d$ 为衍射晶体的晶格常数, $n$ 为衍射级数, $\theta$ 为布拉格衍射角, $\lambda$ 为出射光波长。

由多通道双晶单色器工作原理可知,连续频率变化且稳定的单色光源输出依赖于主、从轴对应晶体片之间动态平行衍射面的平行度精度。已有研究表明:当衍射面的平行度误差增加时,出射光的强度急剧下降,系统性能降低甚至失效。因此,多通道双晶单色器实现的核心难点在于主、从轴对应工作晶体片间动态衍射面平行度精度的提高。

### 2.2 晶体片平行度误差分析

多通道双晶单色器的晶体片分别由主、从轴电机转轴单独驱动,因此对应工作晶片之间动态衍射面平行度误差的主要来源为:

(1)机械安装误差包括晶片贴装误差、多面体转轴转动中心偏移和主、从轴转动轴线不平行等,如图 3 所示;

(2)随机干扰包括温湿度变化、冷却回路干扰以及人员走动等。

机械安装误差会直接影响晶片初始位置的安装精度,差异化的晶片安装角度会导致在工作区间段内主、从轴对应晶体间平行度误差过大,难以满足系统平行度精度要求,因此,通过控制主、从轴的相对转动降低动态衍射面的平行度误差,是减小机械安装误差的关键。随机干扰可借助反馈控制等手段来抑制,从而进一步提升系统控制的稳定性。

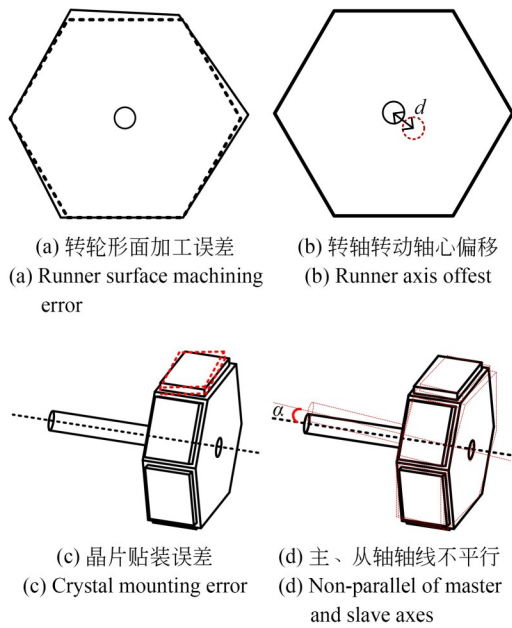


图 3 多通道双晶单色器机械安装误差来源

Fig. 3 Sources of multi-channel DCM mechanical installation error

### 3 控制器设计

#### 3.1 平行度误差补偿策略

以正六棱柱晶体转轮为例,图 4 为单转动周期内,主轴电机以 1 r/s 的匀速旋转角度位置变化曲线。然而,由于存在晶片贴装以及设备加工等

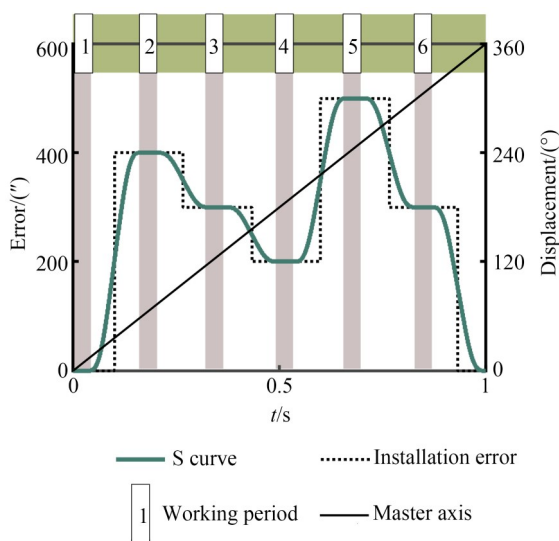


图 4 晶体转轮机机械安装误差曲线及 S 形曲线运动轨迹规划

Fig. 4 Mechanical installation errors and S-shaped curve motion path planning of crystal rotating shaft

机械安装误差,当从轴以相同的速度跟随主轴转动时,主-从轴对应工作晶片之间的平行度误差如图 4 中虚线所示。从轴上相邻晶片在切换过程中会产生存在明显的角度跃迁,而角度误差将作为主-从轴同步运动误差,随着电机运动周期性重复出现。为了满足双晶单色器光谱扫描的需求,每组对应的晶片之间需在约  $1^\circ$  的工作区间(图中阴影区域)保持高精度平行对准,其余角度范围内可进行晶片平行角度的动态调整。考虑到相邻晶片之间角度位置的切换会导致从轴位置跟踪产生突变,系统控制量发生振荡,不利于晶片在工作前实现平行角度误差的收敛。本文采用图 4 中所示的四阶 S 形曲线对从轴运动参考轨迹进行规划,以降低运动过程中位置跟踪值突变对角度控制精度的影响<sup>[23-24]</sup>。

结合系统的工作特点分析,晶体片机械安装误差的补偿可转化为从轴电机的重复参考运动轨迹跟踪,以实现对应工作晶片的高精度平行对准。ILC 是一种能够有效提高重复轨迹跟踪精度的运动控制策略,通过 ILC 的迭代,可以消除电机重复性运动误差,从而提升从轴电机的位置跟踪精度,以满足晶体片安装误差补偿的控制需求。此外,考虑到系统工作过程中存在的随机干扰,MPC 反馈控制策略可抑制电机转动过程中的干扰,干扰的抑制也有助于提升 ILC 前馈控制的效果,加快 ILC 的收敛速度。因此,本文基于 ILMPC 控制策略实现主-从转轴上对应晶片平行对准的控制目标,并搭建单轴电机运动实验平台,对从轴电机的跟踪效果进行验证。

#### 3.2 MPC 控制器

MPC 通常使用辨识的模型来预测控制对象未来多个采样周期的控制输出,借助优化控制算法,通过最小化系统期望输出与预测输出的差异值来计算未来多个周期的系统控制量输出,以实现系统对象输出跟踪相应参考轨迹信号的控制目标。

MPC 的控制框架如图 5 所示。其中,  $r(k)$  为从轴电机的参考轨迹输入信号,  $y(k)$  为系统的位置反馈输出,  $u(k)$  为系统的输入控制信号,  $X_m$  表示预测时域内被控系统的状态输出序列,  $Y_m$  表示预测时域内系统的输出序列,  $R_s$  表示预测时域内参考轨迹的输出序列。MPC 优化控制算法分

别由参考轨迹、状态预测、预测输出以及滚动优化 4 部分组成,同时 MPC 控制器端并联一个积分器,有助于降低系统稳态误差。

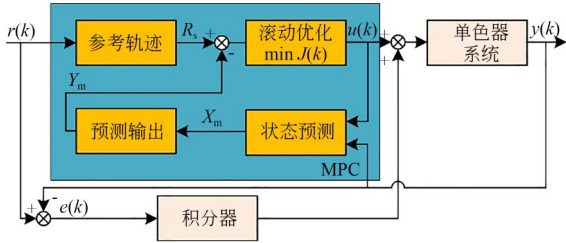


图 5 MPC 控制器框架

Fig. 5 Control framework of MPC

通常利用系统辨识结果可得系统离散线性动力学模型增量式,即有:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k) \\ y(k+1) = C_d \Delta x(k+1) + y(k) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = x(k+1) - x(k) \\ \Delta u(k+1) = u(k+1) - u(k) \end{cases} \quad (3)$$

系统预测区间与控制区间分别设置为  $N_p$  和  $N_c$ ,超过控制区间的控制量增量  $\Delta u(k) = 0, N_c + 1 \leq k \leq N_p$ 。

由此定义新的状态变量  $X_m(k) = [\Delta x(k), y(k)]^T$ ,式(2)可简化为:

$$\begin{cases} X_m(k+1) = A X_m(k) + B \Delta u(k) \\ y(k) = C X_m(k) \end{cases}, \quad (4)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ C_d A_d & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_d \\ C_d B_d \end{bmatrix}, C = [0 \quad 1].$$

以式(4)所示的增广模型为基础进行迭代计算,并以矩阵形式表达系统的预测输出,得到:

$$Y_m = F X_m(k) + K \Delta U, \quad (5)$$

式中:  $Y_m$  为  $N_p \times 1$  维矩阵,  $\Delta U$  为  $N_c \times 1$  维矩阵,  $F$  为  $N_p \times (n+1)$  维矩阵,  $K$  为  $N_p \times N_c$  维矩阵。各矩阵的表达式如下:

$$Y_m = \begin{bmatrix} y(k+1|k) & y(k+1|k) & \cdots & y(k+N_p|k) \end{bmatrix}^T, \\ F = [CA \quad CA^2 \quad \cdots \quad CA^{N_p}]^T, \\ \Delta U = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+N_c-1)]^T,$$

$$K = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}.$$

结合当前位置状态反馈设定预测区间内的参考轨迹为:

$$R_s = [r_s(k+1|k), r_s(k+1|k), \dots, r_s(k+N_p|k)]^T.$$

为实现预测输出跟踪参考轨迹信号的控制目标,优化算法的评价函数定义如下:

$$J(k) = [Y_m - R_s]^T Q [Y_m - R_s] + \Delta U^T R \Delta U, \quad (6)$$

式中: 对角矩阵  $Q = Q_0 \times eye(N_p)$ ,  $R = R_0 \times eye(N_c)$  分别为系统预测输出与控制输出的可调权重矩阵。其中,  $Q_0$  反映系统预测输出与参考轨迹的误差水平,  $Q_0$  越大, 轨迹跟踪精度越高;  $R_0$  则表示控制量变化对系统输出的影响,  $R_0$  越大, 系统控制量输出越平滑。当评价函数  $J(k)$  取得最小值时, 系统在控制量平滑的同时, 预测输出与参考轨迹之间的误差达到最小。

将式(5)代入式(6), 推导得到评价函数与控制量增量之间的表达式为:

$$J(k) = \Delta U^T (K^T Q K + R) \Delta U + 2 \Delta U^T K^T Q (F X_m(k) - R_s) + (F X_m(k) - R_s)^T Q (F X_m(k) - R_s). \quad (7)$$

在不考虑系统变量约束的条件下, 当评价函数对  $\Delta U$  求导等于零时,  $J(k)$  取得最小值, 同时求得  $\Delta U$  的解析解为:

$$\Delta U = (K^T Q K + R)^{-1} K^T Q (R_s - F X_m(k)). \quad (8)$$

$u(k+1|k)$  的解析解为:

$$u(k+1|k) = u(k) + L (R_s - F X_m(k)), \quad (9)$$

式中:  $L$  为  $(K^T Q K + R)^{-1} K^T Q$  矩阵的第一行元素。

从式(9)可以看出, MPC 控制律类似于时变增益的比例控制器, 当预测模型存在偏差时, 系统存在明显的稳态误差, 因此, 在控制器端并联一个积分器有助于降低稳态误差。

将式(9)代入式(4)可得:

$$X_m(k+1) = (A - BLF) X_m(k) + BLR_s. \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 当矩阵  $A - BLF$  所有的特征值均在单位圆以内时, 系统的状态及输出值均保持收敛状态, 系统是渐进稳定的。因此, 设计 MPC 控制器时需满足矩阵  $A - BLF$  的所有特征值在单位圆内的系统收敛条件。

当考虑系统内存在未知干扰时,式(4)所示增广系统模型可写为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_m(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}_m(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\Delta d(k) \\ y(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}_m(k) \end{cases} \quad (11)$$

令  $\mathbf{R}_s = 0$ , 考虑干扰  $d_k$  对系统的影响时有:

$$\mathbf{X}_m(k+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{L}\mathbf{F})\mathbf{X}_m(k) + \mathbf{D}\Delta d(k), \quad (12)$$

当干扰趋于不变时,有  $k \rightarrow \infty, \Delta d(k) \rightarrow 0$ , 因此式(13)可写成:

$$\mathbf{X}_m(k+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{L}\mathbf{F})\mathbf{X}_m(k). \quad (13)$$

在满足系统收敛的条件下,系统的状态与输出均有界,系统可保持稳定状态。

### 3.3 ILMPC 控制器

对于重复轨迹跟踪的应用场景,迭代学习控制是一种有效提高轨迹跟踪精度的运动控制算法。该方法通过存储上一周期跟踪的误差及控制量输入信息,迭代生成当前周期的控制量输入信号,以实现误差收敛的控制效果。

ILMPC 整体控制框架如图 6 所示。其中,  $r(k)$  表示重复参考轨迹输入,  $k$  表示单周期内信号序列索引,  $y_{i+1}(k)$  为第  $i+1$  次单色器系统控制对象输出, 下标  $i$  表示系统迭代次数,  $u_{ff,i+1}(k)$  和  $u_{fb,i+1}(k)$  分别表示 MPC 与 ILC 控制器的控制量输入,  $d_{i+1}(k)$  为系统输入干扰, 包括电机扭矩脉动、环境因素等随机性干扰,  $N_{i+1}(k)$  为系统噪声, 包括编码器、电子电路噪声等。由图 6 可得系统第  $i+1$  次输出的表达式为:

$$y_{i+1}(k) =$$

$$T(z)r(k) + J(z)(u_{ff,i+1}(k) + d_{i+1}(k)), \quad (14)$$

式中:  $T(z)$  和  $J(z)$  分别表示系统灵敏度函数与过程灵敏度函数, 各函数的具体表达式如下:

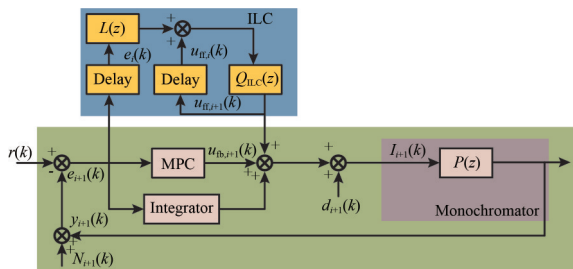


图 6 ILMPC 控制器框架

Fig. 6 Control framework of ILMPC

$$\begin{cases} \mathbf{X}_m(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}_m(k) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\Delta d(k) + \mathbf{U}\Delta u_{ff,i+1}(k) \\ \Delta u_{ff,i+1}(k) = u_{ff,i+1}(k) - u_{ff,i+1}(k-1) \end{cases} \quad (21)$$

$$T(z) = \frac{G_p(z)C_{fb}(z)}{1 + G_p(z)C_{fb}(z)}, \quad (15)$$

$$J(z) = \frac{G_p(z)}{1 + G_p(z)C_{fb}(z)}, \quad (16)$$

式中:  $G_p(z)$  表示从轴电机控制对象,  $C_{fb}(z)$  为前节所述融合 MPC 与积分误差补偿的反馈控制器。

根据轨迹跟踪误差的定义, 系统输出误差可表示为:

$$e_{i+1}(k) = r(k) - y_{i+1}(k) - N_{i+1}(k). \quad (17)$$

依据 ILC 的控制律, 可表示为:

$$u_{ff,i+1}(k) = Q_{ILC}(u_{ff,i}(k) + L(z)e_i(k)), \quad (18)$$

式中:  $Q_{ILC}$  为低通滤波器, 用于降低高频噪声对 ILC 控制量计算的干扰;  $L(z)$  为学习函数, 用于迭代生成下一周期 ILC 的控制量。

结合式(14)与式(18), 可进一步得到 ILC 控制量的表达:

$$\begin{aligned} u_{ff,i+1}(k) = & Q_{ILC}(1 - L(z)J(z))u_{ff,i}(k) + \\ & Q_{ILC}[(1 - T(z))r(k) - J(z)d_i(k)] - \\ & Q_{ILC}(1 - T(z))N_i(k). \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可得, 当不等式条件(20)满足时, ILC 控制量  $u_{ff,i+1}(k)$  可随迭代次数的增加实现收敛。

$$\|Q_{ILC}(1 - L(z)J(z))\| < 1, \quad (20)$$

式中  $\|*\|$  表示传递函数的无穷范数。

从 ILC 控制量  $u_{ff,i+1}(k)$  的收敛条件可知, 滤波器  $Q_{ILC}$  的设计对于 ILC 的控制量输出影响较大。当滤波器的截止频率较高时, 控制器对系统噪声的抑制减弱, ILC 收敛速度加快, 同时系统噪声也会参与控制量的迭代计算, 使得控制量收敛条件难以满足, 造成系统发散; 当滤波器选取较低的截止频率时, 控制器对系统噪声的抑制增强, 降低噪声对系统控制精度的影响, ILC 收敛误差会减小, 但迭代次数增加的同时限制了可跟踪参考轨迹的带宽, 因此在 ILC 算法设计过程中, 需结合系统误差的频率分布情况, 选取合适的滤波器带宽, 降低噪声对控制系统的影响, 以达到理想的轨迹跟踪效果。

考虑将 ILC 控制量引入系统状态空间方程, 式(11)可改写为:

由式(21)可知,在第*i*+1迭代周期,  $\Delta u_{ff,i+1}(k)$ 由 ILC 控制量  $u_{ff,i+1}(k)$ 预先计算得到,并作为常值输入参与系统状态迭代计算,不会改变系统状态的稳定性,当系统满足收敛条件,即矩阵  $A-BLF$  的所有特征值在单位圆内时,系统仍然保持稳定状态。

当迭代次数*i*趋于无穷时,ILC 控制量输出为:

$$u_{ff,\infty}(k) = \frac{Q_{ILC}L(z)[(1-T(z))r(k)-J(z)d_i(k)]}{1-Q_{ILC}(1-L(z))J(z)} \quad (22)$$

同时第*i*+1次的系统控制误差  $e_{i+1}(k)$ 的表达式如下:

$$e_{i+1}(k) = r(k) - y_{i+1}(k) = \frac{(1-T(z))(1-Q_{ILC})}{1-Q_{ILC}(1-L(z))J(z)} r(k) + J(z) \left[ \frac{Q_{ILC}L(z)J(z)}{1-Q_{ILC}(1-L(z))J(z)} d_i(k) - d_{i+1}(k) \right] \quad (23)$$

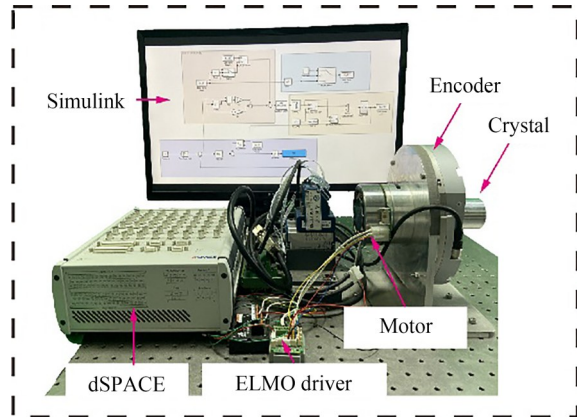
由式(23)可知,当  $Q_{ILC} = 1$  时,ILC 算法收敛误差为  $J(z)(d_i(k) - d_{i+1}(k))$ ,当干扰为重复干扰时,即  $d_i(k) = d_{i+1}(k)$ ,系统收敛误差为 0;当干扰为非重复性干扰时,系统收敛误差难以在 ILC 迭代过程中予以消除,降低了算法的控制效果。因此通过 ILC 与 MPC 的结合,借助 MPC 良好的时域闭环跟踪性能,不仅能保留 ILC 的周期性跟踪轨迹与重复性干扰的处理能力,还能降低非重复干扰对 ILC 迭代过程的影响。

## 4 实验与结果分析

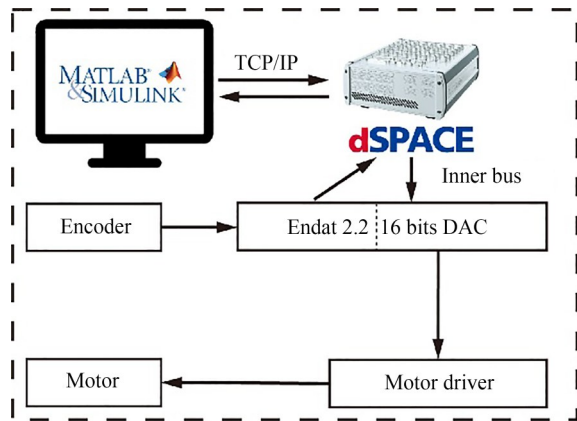
### 4.1 实验平台搭建

实验搭建的双晶单色器单轴电机运动平台如图 7 所示。该单轴电机运动平台的机械结构部分由 Maxon 无刷电机、Elmo 电机驱动器、海德汉编码器和多面体晶体转轴组成,控制器算法设计在含 Simulink 开发环境的上位机上完成,算法部署在 dSPACE-MicroLabBox 以验证控制器的使用效果。

实验平台软硬件系统框架如图 7(b) 所示。上位机通过 TCP/IP 协议与 dSPACE-MicroLab-



(a) 实验平台硬件实物  
(a) Hardware of the experimental platform



(b) 实验平台系统搭建  
(b) Experimental platform system

图 7 双晶单色器单轴电机运动实验平台

Fig. 7 Experimental system for single-axis motor motion of double crystal monochromator

Box 平台进行通信连接,实现控制算法在嵌入式平台上的部署。系统在实际运行时,dSPACE-MicroLabBox 平台通过内置的 16 位数字模拟转换(Digital to analog converter, DAC)接口输出  $\pm 10\text{ V}$  的电流控制信号控制 Elmo 驱动器实现对电机的转动控制,同时多面体晶体转轴的转动位置信号经编码器 Endat 2.2 接口传回 dSPACE-MicroLabBox 平台,实现转轴位置信号的实时反馈,以此形成单轴运动平台的闭环控制。

### 4.2 系统辨识

为了辨识系统的线性动态特性,实验采用式(24)所示的扫频信号驱动单轴实验平台转动。系统的采样频率设置为 5 kHz,扫频信号的直流

增益设置为 1.5 A, 以避免辨识过程中可能出现往复转动中摩擦特性的不同对于系统辨识造成的干扰。

$$B_d = u(t) = 1.5 + 0.5 \times \sin(2\pi ft), \quad (24)$$

式中:  $u(t)$  表示扫频输入的电流信号,  $f$  表示扫频信号频率, 其频率变化为 0.1~500 Hz。

利用辨识实验采集到的结果, 结合 Matlab 的系统辨识工具箱可得到系统连续时间状态方程的表达。为便于 MPC 控制算法设计, 采用零阶保持器将状态方程离散化, 可得系统离散状态方程为:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) = C_d x(k) \end{cases}, \quad (25)$$

式中:

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.9978 & -0.03873 & -0.006018 & 8.815e-06 \\ 0.05414 & 0.9044 & 0.3828 & 0.0002275 \\ 0.009101 & -0.4077 & 0.9065 & -0.0001321 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 1.037 \times 10^{-9} \\ 2.367 \times 10^{-8} \\ -1.163 \times 10^{-8} \\ 0.0002 \end{bmatrix}, C_d = \begin{bmatrix} 66310 \\ -1050 \\ -783.9 \\ 0 \end{bmatrix}^T.$$

图 8 所示为辨识模型与系统实际测量的频率响应结果对比。由图可知, 实验平台的一阶频率约为 327 Hz, 在 0~400 Hz 内, 式 (25) 所示系统辨识模型可有效反映实验平台的动态特性。需要说明的是, 系统辨识的名义模型为实际系统的近似动态模型, 辨识模型与实际系统在中间频段的吻合程度高, 而随着频率的提升, 系统中噪声的影响逐渐增强。

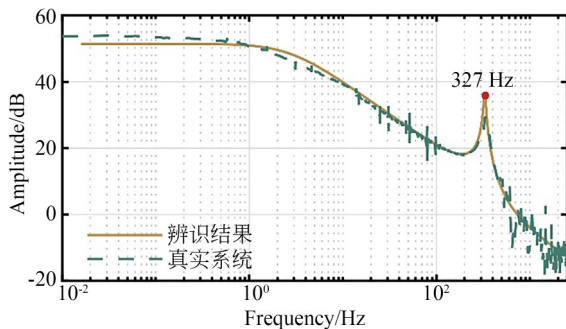


图 8 实验平台频率响应

Fig. 8 Frequency responses of experimental system

### 4.3 实验设计

以正六棱柱晶体转轮为实验对象, 实验采用四阶 S 形曲线作为参考轨迹对提出的控制器算法进行验证, 信号幅值均设置为 2 700", 电机转速依次设置为 1, 2, 3, 4, 5 r/s, 由此可知, 信号频率依次设置为 6, 12, 18, 24, 30 Hz。图 9 所示为 18 Hz 四阶 S 形曲线参考轨迹。

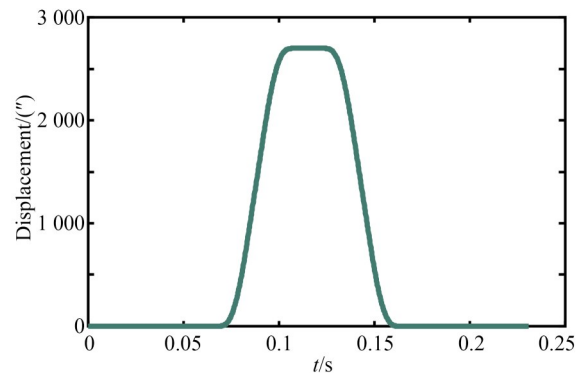


图 9 18 Hz 四阶 S 形曲线参考轨迹

Fig. 9 Reference trajectory of 18 Hz fourth-order S-curve

分别针对上述参考信号进行运动轨迹跟踪实验, 并对比 PID, MPC, 融合干扰观测器 (Disturbance Observer, DOB) + MPC, ILC + PID 及 ILMPC 5 种运动控制算法。其中, 位置-速度双 PID 控制器的控制参数设置如表 1 所示。

表 1 位置-速度双 PID 控制器参数

Tab. 1 Controller parameters of position-velocity double loop controller

参数	速度环	位置环
$K_p$	53.046 9	0.003 4
$K_i$	3 633.593 4	0.170 3
$K_d$	1.943 8	—

MPC 控制器的参数中, 预测时域  $N_p$  设置为 22, 控制时域  $N_c$  设置为 3。

ILC + PID 控制器策略中, ILC 控制算法中学习函数设置为过程灵敏度函数的逆模型, 学习函数  $L(z)$  的传递函数表达为:



$$L(z)=\frac{a_1(z+a_2)^4(z^2+a_3z+a_4)(z^2+a_5z+a_6)}{z(z+b_1)(z+b_2)(z-1)^3(z^2+b_3z+b_4)}, \quad (26)$$

式中： $a_1=2.57 \times 10^6$ ,  $a_2=-0.9991$ ,  $a_3=-1.987$ ,  $a_4=0.9875$ ,  $a_5=-1.823$ ,  $a_6=0.9849$ ,  $b_1=0.7705$ ,  $b_2=-0.9901$ ,  $b_3=-1.253$ ,  $b_4=0.4663$ .

ILC 控制算法采用 PD 型控制律作为学习函数,其中  $K_p$  设置为 0.1,  $K_d$  设置为 30。低通滤波器  $Q_{ILC}$  的截止频率设置为 100 Hz,同时滤波器采用 Matlab 中的 Butter 函数生成巴特沃斯滤波器实现。

#### 4.4 单色器运动轨迹跟踪实验

采用四阶 S 形曲线作为从轴运动参考轨迹,可有效降低晶体片切换过程中变速度、加速度造

成的冲击对轨迹跟踪误差的影响,因此可采用 6~30 Hz 的四阶 S 形曲线轨迹开展轨迹跟踪实验,以验证所提控制器的性能。表 2 所示为单色器工作区间段内,不同信号频率下轨迹跟踪的有效值误差与最大值误差的统计结果,同时轨迹跟踪误差随着迭代次数的变化情况如图 10 所示。

分析实验结果可知:

(1) ILC 控制策略对于轨迹跟踪误差的抑制效果明显,其跟踪误差均随着迭代次数的增加实现了有效收敛。在 18 Hz 四阶 S 形曲线跟踪实验中,ILC+PID 与 ILMPC 控制器策略收敛的误差值分别为 5.4" 与 1.44",相比未加载 ILC 的 PID, MPC 以及 DOB+MPC 控制器,其轨迹跟踪误差分别降低了 98.67%,98.52% 与 98.26%。该结果表明,ILC 算法借助算法迭代能明显降低从轴电机的重复运动轨迹误差。

表 2 四阶 S 型曲线轨迹跟踪结果

Tab. 2 Error results of fourth-order motion reference tracking

转速/ ( $r \cdot s^{-1}$ )	频率/ Hz	$e_{rms}/(")$					$e_{max}/(")$				
		PID	MPC	DOB+ MPC	ILC+ PID	ILMPC	PID	MPC	DOB+ MPC	ILC+ PID	ILMPC
1	6	67.33	11.36	13.76	5.94	1.22	70.48	14.51	15.85	3.06	1.35
2	12	118.20	52.49	30.37	3.67	1.26	131.90	56.95	34.87	4.37	1.42
3	18	406.13	96.98	82.94	5.40	1.44	436.73	100.66	85.64	5.70	1.64
4	24	766.11	138.99	86.55	7.53	1.81	791.85	146.33	96.53	8.23	2.03
5	30	1 030.61	180.25	159.64	10.36	2.66	1 059.52	204.85	185.44	12.33	3.37

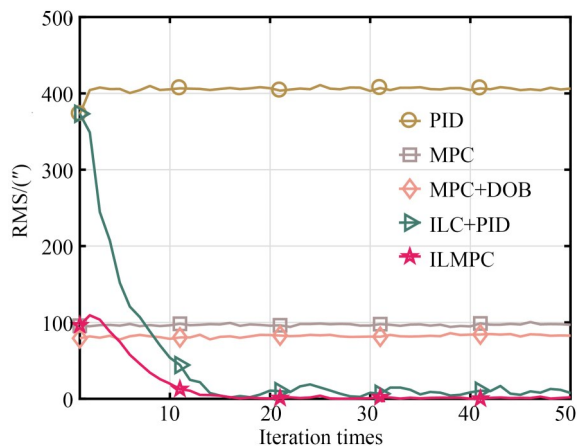


图 10 18 Hz 四阶 S 形曲线下跟踪误差有效值的迭代曲线  
Fig. 10 RMS error convergence at different iterations in 18 Hz Fourth-order motion reference tracking

(2) 单独对比不含 ILC 算法的控制器策略,发现 MPC 的控制效果依然好于 PID 控制器。在 18 Hz 跟踪实验中,PID 与 MPC 控制器策略收敛误差的有效值误差分别为 406.13" 与 96.98",由此表明,MPC 算法相比 PID 能实现更高精度的从轴电机轨迹跟踪效果。

以 18 Hz 四阶 S 形曲线轨迹跟踪实验为例,对控制策略的跟踪效果做进一步说明,图 11(a) 和 11(b) 分别显示了第 20 次迭代时曲线跟踪与跟踪误差效果对比。同时图中还针对双晶单色器工作区间段进行了局部放大,以便于进一步观察实验效果。

由图 11 可知,在水平段双晶单色器工作区间

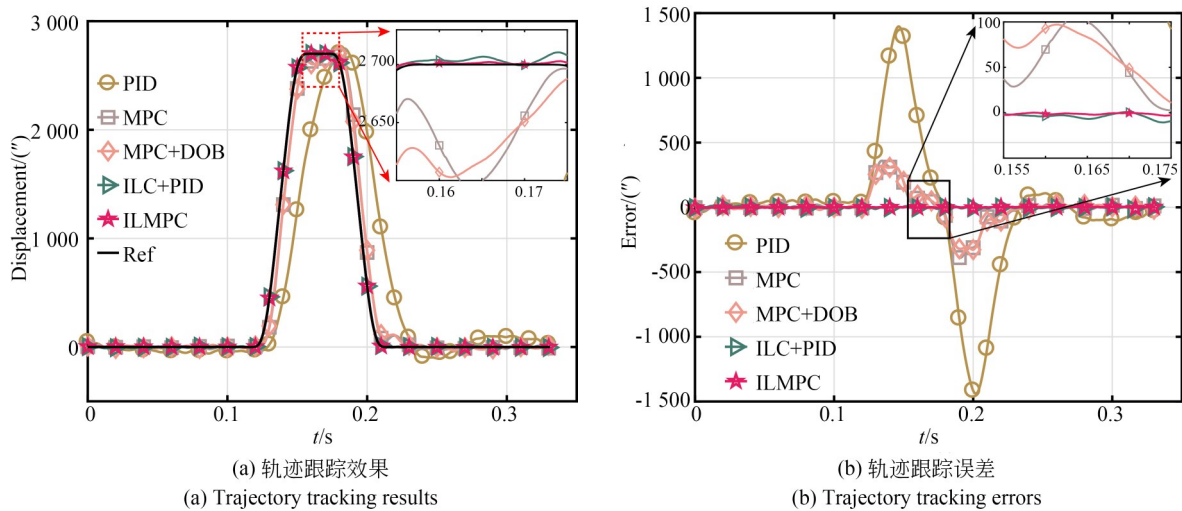


图 11 18 Hz 四阶 S 形曲线信号跟踪

Fig. 11 18 Hz fourth-order motion reference tracking performance

内,ILMPC 控制器策略下曲线跟踪效果最佳,该段工作区间内位置跟踪的有效值误差为  $1.44''$ , 相比于 PID, MPC, DOB+MPC 以及 ILC+PID 组合,其误差有效值分别降低了 99.64%, 98.52%, 98.26% 与 73.33%。实验结果表明,所提出的 ILMPC 控制器策略可实现晶体片位置安装误差的有效补偿,同时相比于其他控制器有更高的位置跟踪精度与晶体片平行精度。

## 5 结 论

本文结合多通道双晶单色器工作原理,分析得到多通道双晶单色器系统中晶体动态衍射

面平行度误差主要来源于晶体片安装,利用安装误差周期性重复出现的特点,提出了 ILMPC 控制策略用于从轴电机周期性轨迹跟踪,以补偿新型多通道双晶单色器结构中晶体片位置的安装误差,并搭建了单轴电机运动平台对所提控制器性能进行验证。四阶 S 形曲线跟踪实验结果表明,MPC 控制器的预测控制优化效果有助于进一步提升 ILC 的控制效果,ILMPC 控制器策略比其他控制器有更好的位置跟踪精度。从轴电机在单色器工作区间段内的位置跟踪有效值误差达到  $1.44''$ ,充分验证了 ILMPC 控制器用于多通道双晶单色器晶体片安装误差补偿的有效性。

### 参考文献:

- [1] FRAHM R, RICHWIN M, LTZENKIRCHEN-HECHT D. Recent advances and new applications of TimeResolved Xray absorption spectroscopy[J]. *Physica Scripta*, 2005: 974.
- [2] MÜLLER O. *Hard X-ray Synchrotron Beamline Instrumentation for Millisecond Quick Extended X-ray Absorption Spectroscopy*[D]. Universität Wuppertal, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften Physik Dissertationen, 2018.
- [3] RICHWIN M, ZAEPER R, LÜTZENKIRCHEN-HECHT D, et al. Piezo-XAFS-time-resolved X-ray absorption spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(3): 1668-1670.

- [4] 董晓浩,凤良杰,康乐,等. 同步辐射 X 射线双晶单色器联动机构[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 224-229.
- [5] DONG X H, FENG L J, KANG L, et al. A mechanical linkage of double crystal X-ray monochromator for synchrotron radiation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 224-229. (in Chinese)
- [5] 卢启鹏,马磊,彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1548-1553.
- LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in vari-

- able included angle plane grating monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1548-1553. (in Chinese)
- [6] 李中亮, 杨俊亮, 朱晔, 等. 同步辐射实验配置对晶体摇摆曲线的影响[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1950-1957.  
LI ZH L, YANG J L, ZHU Y, *et al.* Effect of the synchrotron radiation experiment configuration on the rocking curve of crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1950-1957. (in Chinese)
- [7] 樊奕辰, 李中亮, 徐中民, 等. 单色器晶体角度微振动的高精度原位检测技术[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 156-164.  
FAN Y CH, LI ZH L, XU ZH M, *et al.* High-accuracy *in situ* detection method of monochromator angular vibration[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 156-164. (in Chinese)
- [8] EZQUERRA T, GARCÍA-GUTIÉRREZ M C, NOGALES A, *et al.* Introduction to the special issue on 'Applications of Synchrotron Radiation in Polymers Science'[J]. *European Polymer Journal*, 2016, 81: 413-414.
- [9] YAMAZAKI H, MATSUZAKI Y, SHIMIZU Y, *et al.* Challenges toward 50 nrad-stability of x-rays for a next generation light source by refinements of SPring-8 standard monochromator with cryo-cooled Si crystals[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2054(1): 060018.
- [10] SERGUEEV I, DÖHRMANN R, HORBACH J, *et al.* Angular vibrations of cryogenically cooled double-crystal monochromators [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(5): 1097-1103.
- [11] CHUMAKOV A I, SERGEEV I, CELSE J P, *et al.* Performance of a silicon monochromator under high heat load[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(2): 315-324.
- [12] 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.* Fast scanning X-ray absorption fine structure spectroscopy monochromator: CN112748136B [P]. 2022-04-01. (in Chinese)
- [13] BRISTOW D A, THARAYIL M, ALLEYNE A G. A survey of iterative learning control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26(3): 96-114.
- [14] BOLDER J, KLEINENDORST S, OOMEN T. Data-driven multivariable ILC: enhanced performance by eliminating L and Q filters[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018, 28(12): 3728-3751.
- [15] 赵希梅, 马志军, 朱国昕. 基于迭代学习与FIR滤波器的PMLSM高精控制[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(9): 10-15.  
ZHAO X M, MA ZH J, ZHU G X. High precision control for PMLSM based on iterative learning and FIR filter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(9): 10-15. (in Chinese)
- [16] WANG Y Q, LIU T, ZHAO Z. Advanced PI control with simple learning set-point design: application on batch processes and robust stability analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 71: 153-165.
- [17] LIU T, WANG X Z, CHEN J H. Robust PID based indirect-type iterative learning control for batch processes with time-varying uncertainties [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(12): 95-106.
- [18] CHEN M Y, LU J S. High-precision motion control for a linear permanent magnet iron core synchronous motor drive in position platform [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 99-108.
- [19] WANG W X, MA J, CHENG Z L, *et al.* Global iterative sliding mode control of an industrial biaxial gantry system for contouring motion tasks [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(3): 1617-1628.
- [20] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制: 现状与挑战[J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 222-236.  
XI Y G, LI D W, LIN S. Model predictive control—status and challenges[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 222-236. (in Chinese)
- [21] 马乐乐, 刘向杰, 高福荣. 迭代学习模型预测控制研究现状与挑战[J]. *自动化学报*, 2022, 48(6): 1385-1401.  
MA L L, LIU X J, GAO F R. Status and challenges of iterative learning model predictive control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(6): 1385-1401. (in Chinese)
- [22] LEE K S, CHIN I S, LEE H J, *et al.* Model predictive control technique combined with iterative learning for batch processes[J]. *AIChE Journal*,

1999, 45(10): 2175-2187.

- [23] 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.

- [24] BOEREN F, BRUIJNEN D, VAN DIJK N, *et al.* Joint input shaping and feedforward for point-to-point motion: automated tuning for an industrial nanopositioning system [J]. *Mechatronics*, 2014, 24(6): 572-581.

#### 作者简介:



何思宇(1993—),男,湖北孝感人,博士研究生,2016年于电子科技大学获得学士学位,2018年于武汉大学获得硕士学位,主要研究方向为电机运动控制策略。E-mail: syhewhu@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、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