

文章编号 1004-924X(2018)10-2455-08

基因测序仪运动平台的高精度定位控制

付云博*, 郭同健

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实现对基因测序仪运动平台的高精度定位控制, 建立了基因测序仪运动平台控制系统。对该系统所采用的数学建模、模型辨识、控制器设计、输入整形等方法进行研究。根据运动平台动力学方程和永磁同步直线电机电压-推力关系构建了运动平台数学模型, 利用频域扫描法在实物实验的基础上辨识出运动平台的模型参数。最后, 基于运动平台模型设计了双闭环控制器和前馈控制器组成的复合控制器来保证运动平台的稳定性和高精度, 同时根据整个系统的主导极点设计了输入整形器以抑制运动平台的残余振荡。实验结果表明: 加入了输入整形的复合控制器将运动平台的稳态重复定位精度从 $\pm 1.47 \mu\text{m}$ 提高到 $\pm 0.354 \mu\text{m}$ 。较传统复合控制器, 本文提出的方法能使基因测序仪运动平台更快进入可用重复定位精度范围, 并基本满足基因测序仪采集图像时所需的稳定性强、精度高等要求。

关键词: 基因测序仪运动平台; 永磁同步直线电机; 频域扫描法; 输入整形; 重复定位精度

中图分类号: TP273.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182610.2455

High-precision position control of a gene sequencer motion stage

FU Yun-bo*, GUO Tong-jian

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

*Corresponding author, E-mail: 1156571223@qq.com

Abstract: To realize high precision position control of a gene sequencer motion stage, a gene sequencer motion stage control system was developed, and its applied methods such as mathematical modeling, model identification, controller design, and input shaping were investigated. First, based on the dynamic equation of the motion stage and the voltage-force relationship of a permanent magnet linear synchronous motor, a model of the motion stage was established. Then the method of frequency domain scan was adopted to determine the model parameters. Finally, a compound controller, combined with a double closed loop controller and forward feedback controller, was designed based on the model of motion stage to ensure stability and high precision of the motion stage, and an input shaper was designed based on the dominant pole of the compound control system to eliminate oscillation in the motion stage. Experimental results indicate that the compound controller with the input shaping improves the repeated positioning accuracy of the motion stage from $\pm 1.47 \mu\text{m}$ to $\pm 0.354 \mu\text{m}$. The proposed design allows the motion stage to achieve the ultimate repeated positioning accuracy faster than the conventional compound controller, and satisfies the requirements of high stability and preci-

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-04-02.

基金项目: 吉林省科技厅重点科技研发项目(专项支持)(No. 20180201118GX)

sion when the gene sequencer generates an image.

Key words: gene sequencer motion stage; permanent magnet linear synchronous motor; frequency domain scan; input shaping; repeated positioning accuracy

1 引言

随着人类基因组计划的实施,基因测序技术快速发展^[1-2],现有的基因测序仪已经难以满足人们对通量的要求,所以在保证基因测序可靠性的前提下提高通量是基因测序技术的重要发展方向。搭载生物芯片的高精度运动平台作为基因测序仪的核心部分,其速度直接决定基因测序仪的通量,其精度决定了基因测序的准确性。新一代基因测序仪为了能达到更高的通量和更可靠的准确性,对高精度运动平台的速度和精度提出了更高的要求。

目前,高精度运动平台的控制方法主要有复合控制^[3-4]、模糊控制^[5-7]、继电反馈控制^[8]、滑膜控制^[9]、前馈补偿控制^[10]及自适应控制^[11-12]等。万勇利^[13]采用闭环 PID 迭代学习抑制 XY 二维运动平台扰动,提高了系统的抗干扰能力。刘武龙^[14]利用 PID+扰动观测器控制策略对高加速度运动平台进行控制,使得高频噪声和低频扰动都得到了有效抑制,运动平台在 9 ms 内达到了 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的定位精度。张刚等^[15]利用内模原理为直线精密运动平台速度环设计了状态反馈控制器,位置环设计了 PID 控制器,使其平台定位精度控制在 $\pm 4 \mu\text{m}$ 以内。TIAN^[16]等人为二维超高精度定位平台设计了基于神经网络的自适应状态反馈控制器,在线自学习神经元权值,提升了定位平台的动态特性和静态特性。本文中基因测序仪运动平台的工作方式与现有基因测序仪运动平台全行程匀速直线运动的工作方式不同,为高频点对点步进式扫描运动,既从当前点以高加速度冲击到下一点,然后等待运动平台稳定到 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 以内,以保证光学系统对运动平台上的生物芯片采集图像时得到较高的能量集中度。由于基因测序仪运动平台负载重心高,加速度冲击大,使得平台残余振荡抑制困难,稳定时间较长。针对基因测序仪运动平台高加速度和高精度的应用特点,设计了闭环+前馈补偿的控制系统,同时采用主动控制策略,在系统输入端设计输入整形器。

输入整形器作为开环控制器对输入信号进行预调整,从而可以在不损失控制裕度的基础上抑制系统振荡,而且它不需要测量装置,因此极大地降低了控制成本,是控制基因测序仪高精度气浮定位平台的理想选择。

2 运动平台的数学模型

2.1 动力学建模

基因测序仪运动平台是一个永磁同步直线电机驱动的二维运动平台,由直线电机、直线导轨、载物滑块和光栅尺等组成。其核心执行机构为永磁同步直线电机,永磁同步直线电机在同步旋转坐标系下 d - q 轴的电压方程为^[17]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - \omega_e \psi_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 分别为定子电压的 d 轴和 q 轴分量; i_d, i_q 分别为定子电流的 d 轴和 q 轴分量; R 是电子电阻; L_d, L_q 分别是 d 轴和 q 轴的电感分量; ω_e 是电角速度; ψ_q 和 ψ_d 分别为 d 轴和 q 轴的磁链。

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_q = L_q i_q \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

位移量与电角度之间的关系可以表述为:

$$\dot{x} = \frac{\tau \omega_e}{\pi} \quad (3)$$

式中: ψ_f 为永磁体磁链, τ 为永磁体极距。综合式(2)和式(3)可以得到:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - \frac{\dot{x}\pi}{\tau} L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q + \frac{\dot{x}\pi}{\tau} (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (4)$$

永磁同步直线电机的电磁推力方程为:

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} [(L_d - L_q) i_q i_d + \psi_f i_q] \quad (5)$$

式中 F_e 为电机输出推力。对于本永磁同步直线电机 $L_d = L_q = L$,同时由于采用 $i_d = 0$ 空间矢量控制换相策略,故:

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} \phi_f i_q. \quad (6)$$

运动平台单向动力学模型由图 1 所示。

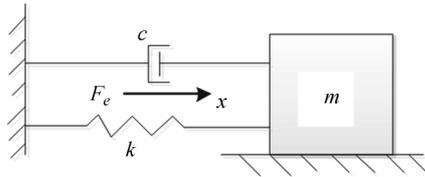


图 1 运动平台力学模型

Fig.1 Mechanical model of motion stage

图中, m 为负载质量; k 为刚度系数; c 为阻尼系数; x 为负载位移量。由牛顿第二定律可得:

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + kx = F_e. \quad (7)$$

综合式(4)、式(6)和式(7)可得:

$$u_q = \frac{2\tau L_q m}{3\pi\phi_f} \ddot{x} + \left(\frac{2\tau L_q c}{3\pi\phi_f} + \frac{2\tau R m}{3\pi\phi_f} \right) \dot{x} + \left(\frac{2\tau L_q k}{3\pi\phi_f} + \frac{2\tau RC}{3\pi\phi_f} + \frac{\pi\phi_f}{\tau} \right) x + \frac{2\tau R k}{3\pi\phi_f} \dot{x}, \quad (8)$$

令 $a = \frac{2\tau L_q m}{3\pi\phi_f}$, $b = \frac{2\tau L_q c}{3\pi\phi_f} + \frac{2\tau R m}{3\pi\phi_f}$, $c = \frac{2\tau L_q k}{3\pi\phi_f} + \frac{2\tau RC}{3\pi\phi_f} + \frac{\pi\phi_f}{\tau}$, $d = \frac{2\tau R k}{3\pi\phi_f}$, 可得运动平台位移-电压传递函数为:

$$P(s) = \frac{x(s)}{U(s)} = \frac{1}{as^2 + bs^2 + cs + d}. \quad (9)$$

2.2 模型参数辨识

本文采用频域扫描法辨识运动平台的模型参数,既对运动平台输入频率由低到高的正弦波 $u_{\sin}(t)$, 然后采集运动平台编码器反馈的位移 $y(t)$, 对两者进行傅里叶变换,再相除即可得到运动平台的频域模型。

对 $u_{\sin}(t)$ 做傅里叶变换:

$$U(\omega) = \sum_{\tau=f_{low}}^{f_{up}} \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u_{\sin}(t+\tau) u_{\sin}(t) \right] W(\tau) e^{-i\omega t}. \quad (10)$$

对 $y(t)$ 做傅里叶变换得到:

$$Y(\omega) = \sum_{\tau=f_{low}}^{f_{up}} \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t+\tau) y(t) \right] W(\tau) e^{-i\omega t}, \quad (11)$$

式中: N 为采样点个数, f_{up} 为扫描频率上限, f_{low} 为扫描频率下限, W 是频域为 $f_{up} - f_{low}$ 的汉宁窗。从而得到运动平台的频域响应传递函数:

$$P(\omega) = \frac{Y(\omega)}{U(\omega)}. \quad (12)$$

然后利用 Matlab 封装函数 $[b, a] = \text{invfreqs}(H, \omega, n, m)$ 求出运动平台的拉氏传函。同时还要注意由于由谐振频率的存在,在用 invfreqs 求拉氏传函所取的频率范围不应超过谐振频率。

辨识实验利用 Aerotech 的 Soloist 线性驱动器为运动平台输入正弦波,海德汉光栅尺作为反馈元件,光栅尺经细分盒细分后的分辨率为 0.5 nm,频域扫描结果如图 3 所示。

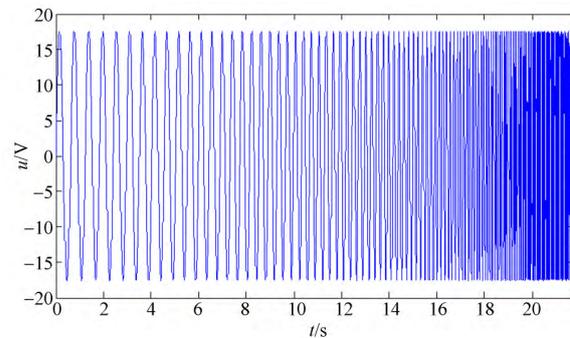
辨识的运动平台传递函数为:

$$P(s) = \frac{23.76}{0.000\ 001\ 58s^3 + 0.000\ 613s^2 + 0.002\ 39s + 1}. \quad (13)$$



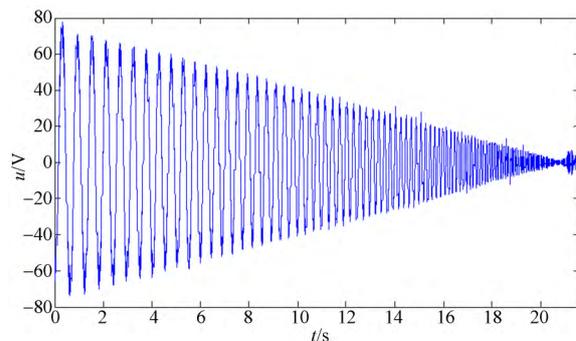
图 2 频域扫描示意图

Fig.2 Schematic diagram of frequency domain scan



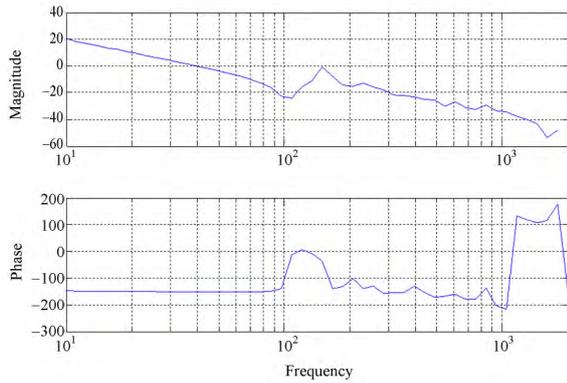
(a) 输入信号 $u_{\sin}(t)$

(a) Input signal $u_{\sin}(t)$



(b) 输出位移 $y(t)$

(b) Output displacement $y(t)$



(c) 频域响应

(c) Frequency response

图 3 运动平台频域扫描结果

Fig. 3 Result of frequency domain scan of motion stage

3 输入整形

输入整形是由一系列脉冲序列信号组成的开环控制方法,即通过一系列脉冲序列信号与期望输入相卷积得到整形后的指令,作为系统新输入的前馈控制方法。输入整形器即为根据振动系统频率和阻尼比设计的脉冲序列。针对基因测序仪运动平台负载重心高、加速度冲击大、残余振动持续时间长但振动频率较为固定的特点,输入整形器可以有效减小振荡频率附近的误差,帮助系统快速稳定。

典型二脉冲型输入整形过程如图 4 所示。图 4 中,原始输入信号 $r(t)$ 与输入整形器 $c(t)$ 所包含的脉冲序列进行卷积,在 0 时刻经过幅值为 A_1 的脉冲序列,在时滞时间 t 后经过幅值为 A_2 的脉冲序列。最终得到输入整形器调整后的阶梯状信号 $u(t)$,理想情况下, $u(t)$ 对应的系统输出 $y(t)$ 无超调无振荡。

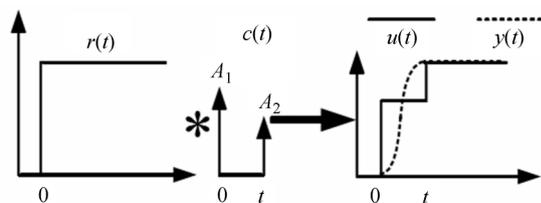


图 4 输入整形原理图

Fig. 4 Schematic diagram of input shaping

通用输入整形器传递函数为:

$$c(s) = \sum A_i \cdot e^{-t_i s} \quad (14)$$

其典型二脉冲型输入整形器的传递函数就可以表述为:

$$c(s) = A_1 + A_2 \cdot e^{-ts} \quad (15)$$

对于一个系统阻尼为 ϵ , 自然频率为 ω_n 的对象:

$$G(s) = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\epsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

两个极点为:

$$s_{1,2} = -\epsilon\omega_n \pm \omega_n \sqrt{1-\epsilon^2}j \quad (17)$$

这两个极点起了系统响应的主导作用,为了消除振荡,可以利用输入整形器配置零点 $S = \sigma + \omega j$ 与该系统的极点对消。将 $S = \sigma + \omega j$ 带入 $c(s) = A_1 + A_2 \cdot e^{-ts}$ 得:

$$c(s) = A_1 + A_2 \cdot e^{-t(\sigma + \omega j)} = A_1 + A_2 e^{-\sigma t} (\cos(\omega t) - \sin(\omega t)j) \quad (18)$$

由于 $S = \sigma + \omega j$ 为 $c(s)$ 的零点,故有:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 e^{-\sigma t} \cos(\omega t) = 0 \\ \sin(\omega t) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

从而可以得到:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = -\epsilon\omega_n \\ \omega = \frac{k\pi}{t} = \omega_n \sqrt{1-\epsilon^2} (k=1, 2, \dots) \end{cases} \quad (20)$$

为使系统输出达到预定点,设立约束方程 $A_1, A_2 > 0, A_1 + A_2 = 1$, 最终求得:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{-\epsilon\pi}{\sqrt{1-\epsilon^2}}}} \\ A_2 = \frac{e^{\frac{-\epsilon\pi}{\sqrt{1-\epsilon^2}}}}{1 + e^{\frac{-\epsilon\pi}{\sqrt{1-\epsilon^2}}}} \\ t = \frac{\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1-\epsilon^2}} \end{cases} \quad (21)$$

4 控制系统设计

基因测序仪运动平台控制系统由复合控制器 + 输入整形器组成,控制结构如图 5 所示。图中 $C_p(s)$ 为位置环控制器, $C_v(s)$ 为速度环控制器, $C_p(s)$ 和 $C_v(s)$ 为闭环控制器一起保证了系统稳定性和控制精度; $FF(s)$ 为前馈补偿控制器,用以对被控对象进行超前补偿,减缓闭环控制器的压力; $F(s)$ 为滤波器,其中包括了低通滤波器和陷

波器,保证系统在高频干扰和共振频率下的稳定性; $I(s)$ 为输入整形器,对轨迹输入提前整形;

$P(s)$ 为运动平台传递函数; $R(s)$ 为轨迹输入; $X(s)$ 为运动平台的实际输出。

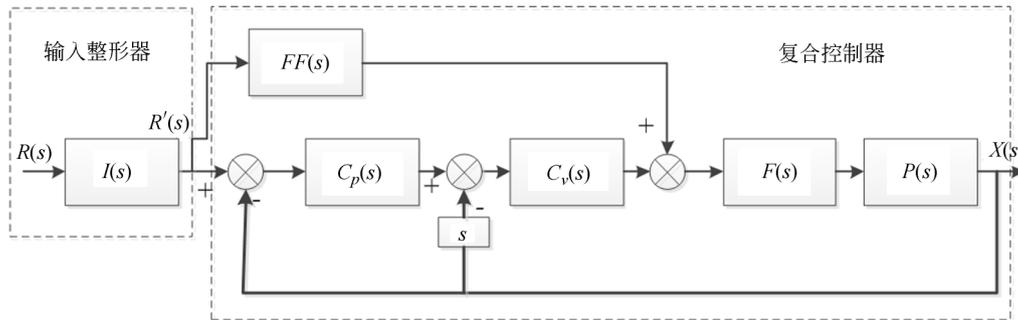


图 5 运动平台控制系统结构图

Fig. 5 Framework of motion stage control system

根据控制结构图可以推出复合控制系统的传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{FF(s)F(s)p(s) + C_p(s)C_v(s)F(s)p(s)}{1 + C_p(s)C_v(s)F(s)p(s)(1 + \frac{s}{C_p(s)})} \quad (22)$$

设计闭环级联控制器时先设计速度环控制器,保证速度环的带宽和稳定裕度,再设计位置环控制器,保证位置环的带宽和稳定裕度。设计原则是在相位裕度大于 30° ,幅值裕度大于 10 dB,剪切频率小于 $1/3$ 共振频率的基础上尽量提高剪切频率。低通滤波器和陷波器的参数可以根据运动平台频域扫描响应曲线设计,其中低通频率选为 1 000 Hz,陷波器频率选为 380 Hz,陷波深度选为 20 dB。

然后设计前馈补偿控制器,前馈补偿控制器的作用是超前补偿系统的速度和加速度误差,所以其形式一般为微分结构,参数与被控对象极点相关,可以利用被动对象传递函数的逆近似,求解前馈控制器参数,同时还要根据系统实际调试过程中速度、加速度与误差曲线的关系来进一步调整前馈控制器参数。

最后设计输入整形器,因为其参数在其他控制器参数确定也就是复合控制系统传递函数 $\Phi(s)$ 确定后才可以求出。输入整形器的作用是抵消复合控制系统传递函数 $\Phi(s)$ 的主导极点对响应的不利影响,当 $\Phi(s)$ 确定后,求出其主导极点,再根据主导极点求出输入整形器参数。

由以下控制器确定的复合控制系统的主导极点只有一对: $S_{1,2} = -117.2 \pm 157.9j$,再根据式

(17)和式(21)可以求出输入整形器 A_1, A_2 和 t 。

根据运动平台数学模型设计出的控制器如表 1 所示。

表 1 运动平台控制器

Tab. 1 Controllers of motion stage

控制器	传递函数	模型参数
位置环控制器	K_p	$K_p = 112.3$
速度环控制器	$P_v + \frac{I_v}{s}$	$P_v = 1.57$ $I_v = 23.6$
低通滤波器	$\frac{\omega_{lp}^2}{s^2 + 2\xi\omega_{lp} + \omega_{lp}^2}$	$\omega_{lp} = 6280$ $\xi = 0.707$
陷波器	$\frac{s^2 + 2\xi_1\omega_{notch} + \omega_{notch}^2}{s^2 + 2\xi_2\omega_{notch} + \omega_{notch}^2}$	$\omega_{notch} = 1832$ $\xi_1 = 0.045$ $\xi_2 = 0.35$
前馈补偿	$K_{aff}s^2 + K_{vff}s + K_{pff}$	$K_{aff} = 0.000\ 0257$ $K_{vff} = 0.000\ 101$ $K_{pff} = 0.0422$
输入整形器	$A_1 + A_2 \cdot e^{-ts}$	$t = 0.0199$ $A_1 = 0.6781$ $A_2 = 0.3215$

5 实验结果

5.1 输入轨迹规划

采用三阶对称式 S 曲线轨迹规划,点对点行进规律为:

$$\begin{cases} j(t) = \text{const} \\ a(t) = jt \\ v(t) = \frac{1}{2}jt^2, \\ s(t) = \frac{1}{6}jt^3 \end{cases} \quad (23)$$

式中： j 是加加速度，为常数； a 是加速度； v 是速度； s 是位移。在峰值加速度为 10 m/s^2 ，峰值速度为 0.075 m/s ，规划时间为 30 ms ，规划单步行程为 1.126 mm 下，轨迹规划如图 6 所示。

对输入轨迹按照前面设计的输入整形器整形，可以得到图 7 所示的整形结果。从图中可以看出，输入整形器将原始输入加权分段为两段冲击，分段后两段冲击总的能量不变，时间间隔为

$1/2$ 震荡周期 $\frac{\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1-\epsilon^2}}$ ，求解得 0.0199 s 。

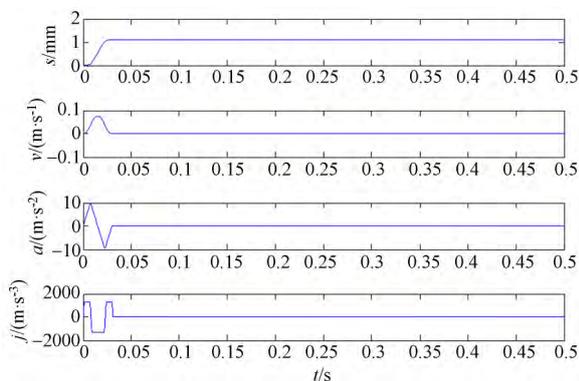


图 6 三阶输入轨迹

Fig. 6 Three-order input track

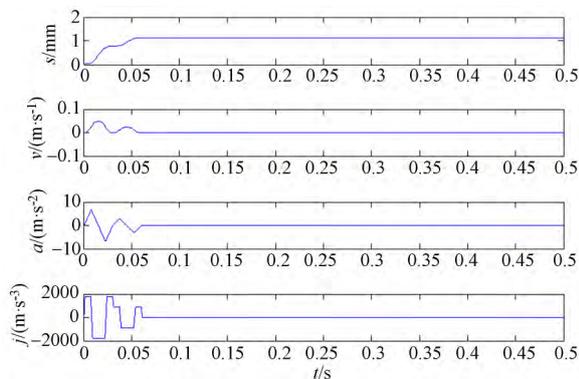


图 7 输入整形后的三阶输入轨迹

Fig. 7 Three-order input track after input shaping

5.2 实物实验

基因测序仪运动平台定位控制实验采用 $X/$

$Y/Z/Theta$ 四维高精度气浮平台，其中 Y 轴为点对点步进式主进给轴，故本实验为 Y 轴控制实验。 Y 轴驱动方式为 BLMC-192 型双直线电机驱动，单电机持续推力为 93.6 N ，持续力系数为 33.09 N/A 。驱动器和控制器为 Soloist HLe 型驱控一体式控制器，驱动器为线性驱动，输出电流峰值为 20 A ，输出电流持续值为 10 A 。光栅尺为海德汉 LIP281 型光栅尺，输出模拟 \sin/\cos 信号的单步步距为 $1 \mu\text{m}$ ，细分 2000 倍后输出的 TTL 数字信号分辨率为 0.5 nm 。 Y 轴负载为 13.6 kg 。

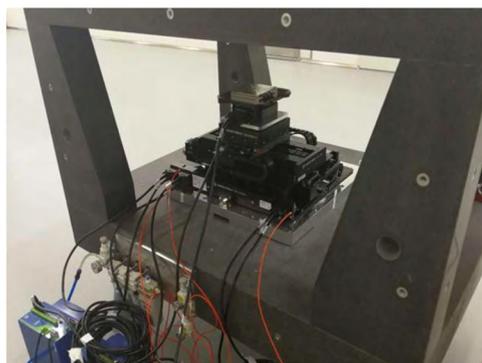


图 8 基因测序仪运动平台控制系统

Fig. 8 Control system for motion stage of gene sequencer

将图 6 所示的三阶 S 曲线轨迹规划和图 7 所示的经过输入整形的三阶 S 曲线轨迹规划分别输入到运动平台控制系统中，得到图 9 所示的响应曲线。由图 9 可以看出，无论是复合控制器还是 Input shaping+复合控制器下的运动平台输出位移，都能稳定地跟随输入轨迹，但是 Input shaping 带来的延迟项使得系统上升时间由 0.03 s 延长至 0.06 s 。

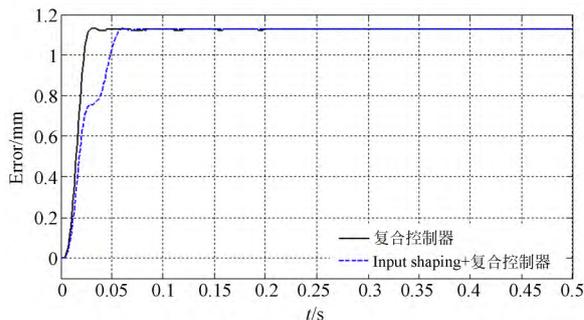


图 9 运动平台的实际响应曲线

Fig. 9 Actual response curve of motion stage

图 10 为复合控制器与 Input shaping+复合控制器下运动平台的位置误差对比。由图 10 可以看出, Input shaping+复合控制器下位置误差

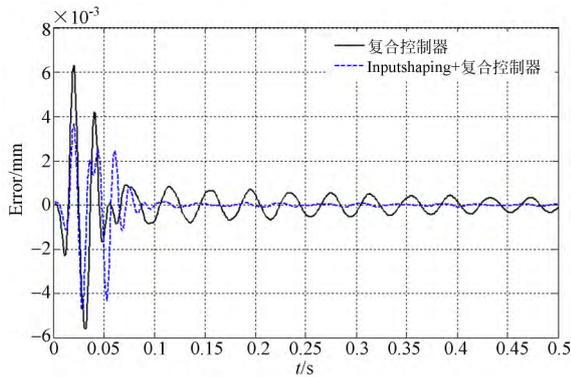


图 10 运动平台的位置误差曲线

Fig. 10 Displacement error curves of motion stage

表 2 重复定位精度统计结果

Tab. 2 Results of repeated positioning accuracy

(μm)

	复合控制器	Inputshaping+复合控制器
1	± 1.47	± 0.354
2	± 1.45	± 0.352
3	± 1.46	± 0.353
4	± 1.43	± 0.353
5	± 1.44	± 0.351
6	± 1.42	± 0.350
7	± 1.46	± 0.354
8	± 1.47	± 0.353
9	± 1.44	± 0.354
10	± 1.41	± 0.352

参考文献:

[1] SERVICE R F. Gene sequencing. The race for the \$1000 genome[J]. *Science*, 2006, 311(5767): 1544-1546.

[2] 马建. 基于固态纳米孔基因测序的关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.
MA J. *Research on Gene Sequencing Technology Based on Solid State Nanopores* [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)

[3] 李兰兰. 步进扫描投影光刻机同步运动控制策略及方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2014.
LI L L. *Synchronization Control Strategy and Method of Step-and-scan Projection Lithography* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese A-

cademy of Sciences, 2014. (in Chinese)

明显优于只有复合控制器的位置误差,尤其是在运动平台位移误差曲线 80 ms 后的稳定段,没有输入整形器的位置误差峰峰值为 $2.94 \mu\text{m}$,而有输入整形的位置误差峰峰值仅为 $0.708 \mu\text{m}$ 。表 2 为多次复合控制器与 Input shaping+复合控制器下运动平台控制实验的重复定位精度统计结果,该结果说明输入整形器使系统进入稳态后的残余振荡得到有效抑制。

6 结 论

本文针对基因测序仪运动平台的高精度定位问题,提出了输入整形器+复合控制器的控制策略。首先,对基因测序仪运动平台建立了数学模型,并用频域扫描法辨识出模型参数,基于基因测序仪运动平台的数学模型,设计了双闭环控制器和前馈控制器组成的复合控制器,复合控制器保证了基因测序仪运动平台在运行过程中的稳定性和高精度。然后,根据复合控制器和运动平台构成的复合控制系统,设计了输入整形器来抑制系统的残余振荡。实验结果表明,虽然输入整形器+复合控制器控制下的系统输出位移要比单一靠复合控制器控制下系统输出位移的速度有所下降,但是牺牲上升时间却能提升定位精度和抑制残余振动,使基因测序仪运动平台更快地进入可用重复定位精度范围,稳定段的重复定位精度从 $\pm 1.47 \mu\text{m}$ 提高到 $\pm 0.354 \mu\text{m}$,为高速高精度基因测序奠定了基础。

[4] 崔晶,王迪凡. X-Y 精密定位平台的敏感函数逆前馈补偿控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1081-1087.
CUI J, WANG D F. Feedforward compensation control of X-Y precise positioning table using inverted-sensitive function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1081-1087. (in Chinese)

[5] 罗品奎. 双直线电机驱动的 H 型运动平台控制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
LUO P K. *Study on Motion Control of H-type Stage Driven by Dual Linear Motors*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

[6] WANG J, LI D. Application of fuzzy PID control in

- PMLSM servo drive system[C]. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE*, 2015:6-10.
- [7] 刘强, 张从鹏. 直线电机驱动的 H 型气浮导轨运动平台[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(10):1540-1546.
LIU Q, ZHANG C P. H type air bearing motion stage driven by linear motors[J]. *Opt. Precision Eng*, 2007, 15(10):1540-1546. (in Chinese)
- [8] CHEN S L, TAN K K, HUANG S. Identification of Coulomb friction-impeded systems with a triple-relay feedback apparatus[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(3):726-737.
- [9] 张博, 韩雪峰, 齐蓉, 等. 复合滑模控制在精密 PMLSM 激光切割运动平台的应用[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(1):84-92.
ZHANG B, HAN X F, QI R, *et al.*. Application of composite sliding mode control on motion platform of PMLSM precision laser cutting[J]. *Opt. Precision Eng*, 2017, 25(1):84-92. (in Chinese)
- [10] 向红标, 裘祖荣, 李醒飞, 等. 精密实验平台的非线性摩擦建模与补偿[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(5):1119-1127.
XIANG H B, QIU Z R, LI X F, *et al.*. Nonlinear friction modeling and compensation of high-precision experimental platforms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1119-1127. (in Chinese)
- [11] WU A Z, CHEN X. Synchronization control for reticle stage and wafer stage based on iterative learning control [J]. *Information Technology Journal*, 2012, 11(4):492-495.
- [12] 朱自立, 徐建明, 孙明轩, 等. XY 平台的迭代学习控制初次控制信号选定[J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(4):535-541.
ZHU Z L, XU J M, SUN M X, *et al.*. Determining initial control signal in iterative learning control for X Y tables[J]. *Control Theory and Applications*, 2016, 33(4):535-541. (in Chinese)
- [13] 万勇利. 闭环迭代学习策略及其在光刻机精密运动平台中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
WAN L Y. *Close-loop Iterative Learning Strategy and Its Application in Precision Motion Platform of Lithography*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 刘武龙. 高加速精密运动平台建模及控制关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
LIU W L. *Research on Key Modeling and Controlling Techniques for High Acceleration Precision Motion Stage*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] 张刚, 刘品宽, 张波, 等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2):371-379.
ZHANG G, LIU P K, ZHANG B, *et al.*. Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):371-379. (in Chinese)
- [16] TIAN Y B, LI T T, CHENG L. Compound control of pneumatic servo positioning platform based on double bellows[C]. *Chinese Automation Congress (CAC), Jinan*, 2017: 3103-3108.
- [17] 袁雷. 现代永磁同步直线电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.
YUAN L. *Control Theory and MATLAB Simulation of Modern Permanent Magnet Synchronous Motor* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016. (in Chinese)

作者简介:



付云博(1991—),男,内蒙古赤峰人,研究实习员,2013年、2016年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为精密驱动控制。E-mail: 1156571223@qq.com



郭同健(1981—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2003年、2005年于南昌大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光电测量和跟踪控制技术。E-mail: tjguo_ciomp@aliyun.com