

直线伺服系统位移跟踪误差的分析与迭代补偿^{*}

付佳倩¹ 李珊珊^{1†} 胡俊宇²

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室,天津 300401)

(2. 湖南大学 机械与运载工程学院,长沙 410082)

摘要 为解决由非线性摩擦力引起的电机位移跟踪误差量化不清晰、补偿设计困难的问题,提出一种基于误差相关系数更新的迭代前馈整定策略. 首先,采用“黏滞摩擦+库仑摩擦”非线性摩擦力模型,分析了直线伺服系统中电机位移跟踪误差产生机理,得到电机位移跟踪误差的具体表达式. 其次,将非线性摩擦力引起的电机位移跟踪误差与参考位移引起的电机位移跟踪误差联系起来,建立了电机位移跟踪误差到速度、加速度、库仑摩擦的映射关系以及误差相关系数,通过更新判断误差相关系数的大小,进行迭代前馈整定,有效补偿电机位移跟踪误差. 最后,在仿真和实验中,不同前馈参数下的误差相关系数大小证明了电机位移跟踪误差分析的正确性,电机跟踪误差的明显降低证明了基于误差相关系数进行迭代前馈整定的有效性.

关键词 直线伺服系统, 电机位移跟踪误差, 非线性摩擦力, 相关系数, 迭代前馈整定

中图分类号:TM359.4

文献标志码:A

Quantitative Analysis and Iterative Compensation of the Motor Tracking Error in Linear Motion Systems^{*}

Fu Jiaqian¹ Li Shanhu^{1†} Hu Junyu²

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract In order to solve the problem of unclear quantification of motor displacement tracking error caused by nonlinear friction and the difficulty of compensation design, an iterative feedforward tuning strategy based on updating the error correlation coefficient is proposed. Firstly, the nonlinear friction model of “viscous friction + Coulomb friction” is used to analyse the mechanism of motor displacement tracking error in linear servo system, and the specific expression of motor displacement tracking error is obtained. Secondly, the motor displacement tracking error caused by nonlinear friction is linked with the motor displacement tracking error caused by reference trajectory, and the mapping relationship between the motor displacement tracking error and velocity, acceleration, Coulomb friction and error correlation coefficients are established. By updating and judging the magnitude of the error correlation coefficients, iterative feedforward tuning is performed to effectively compensate the motor displacement tracking error. Finally, the size of the error correlation coefficients in simulation and experiment under different feedforward parameters proves the correctness of the motor displacement tracking error analysis, and the

2024-09-04 收到第 1 稿,2024-10-13 收到修改稿.

^{*} 河北省自然科学基金资助项目(E2024202079),中央引导地方科技发展资金项目(226Z1805G),2022 年河北省专业学位教学案例库立项建设项目(KCJSZ2022017),Natural Science Foundation of Hebei Province (E2024202079),Central Guided Local Science and Technology Development Funds Project (226Z1805G),Project Construction of Professional Degree Teaching Case Bank in Hebei Province in 2022 (KCJSZ2022017).

[†] 通信作者 E-mail:shanhuili@hebut.edu.cn

obvious reduction of the motor tracking error proves the effectiveness of iterative feedforward tuning based on the error correlation coefficients.

Key words linear servo system, motor tracking error, nonlinear friction, correlation coefficient, iterative feedforward tuning

引言

以直线电机作为驱动的伺服系统,因其没有中间机械传动环节,具有高加速度、高速度、高效率、高精度等显著优点,广泛应用于高精度数控机床、光刻机、半导体封装领域^[1-4].在直线伺服系统运行过程中,电机位移跟踪误差是表征直线伺服系统性能的重要指标.在高精密运动控制场景中,系统设计需要追求零稳态误差以及尽量小的动态误差,以确保直线伺服系统具有高定位精度能力与良好的动态响应性^[5].

非线性摩擦力是一种与参考位移高度相关的外部干扰,在重复性运动中给直线电机带来重复性的跟踪误差,严重影响直线伺服系统位移跟踪性能.基于PI-D架构的反馈控制可实现电机位移零稳态跟踪误差.因此直线伺服系统位移跟踪精度的提升主要在于减小电机位移动态跟踪误差.

基于模型的前馈控制方法能够有效地补偿伺服系统的动态跟踪误差^[6],广泛应用于跟踪性能要求严格的运动场景中.前馈控制器参数的整定质量直接影响前馈控制的补偿效果,即影响伺服系统的动态跟踪误差大小. Butler^[7]基于加速度前馈,提出以递归最小二乘法进行自适应加速度前馈参数整定.张彦龙等^[8]基于“速度+加速度+加加速度”前馈结构,建立各个前馈参数对电机位移跟踪效果的模糊规则,实现了前馈参数的模糊自整定.戴泳尧等^[9-12]阐述了由参考位移引起的电机位移跟踪误差的产生机理,建立了跟踪误差与参考位移微分项之间的关系式,提出基于二分法进行参考位移各阶微分前馈项的逐项整定方法.上述前馈补偿策略都能够有效减小电机位移跟踪动态误差,但均忽略了直线电机所受非线性摩擦力的影响.非线性摩擦力是一种与参考位移高度相关的外部干扰.基于摩擦力模型的前馈补偿^[13-15]、自适应鲁棒控制^[16-20]和智能控制^[21]等虽然能够有效减小非线性摩擦力带来的电机位移跟踪误差,但实现步骤复杂,工业应

用有待进一步探索.工业中常用的前馈补偿策略由于缺乏对电机位移跟踪误差产生机理的认识,无法有效整定前馈控制器,从而无法进行全面且有针对性的补偿.

为实现电机位移跟踪误差的量化与补偿设计,本文基于“库仑摩擦+黏性摩擦”非线性摩擦模型,在PI-D负反馈控制的直线伺服系统中,通过传递函数推导电机位移误差产生机理,并得到电机位移跟踪误差的具体表达式.其次,将非线性摩擦引起的电机位移跟踪误差与参考位移引起的电机位移跟踪误差联系起来,建立电机位移跟踪误差到速度、加速度、库仑摩擦的映射关系以及误差相关系数.通过更新判断误差系数进行前馈参数迭代整定,有效补偿电机位移跟踪误差.实验验证了直线伺服系统位移跟踪误差分析的正确性和前馈参数整定方法的有效性.

1 直线位移跟踪误差产生机理

1.1 直线伺服系统数学模型

直线伺服系统动力学模型时域表达式为

$$m \frac{d^2 x_m(t)}{dt^2} + T_d(t) = f_e(t) \quad (1)$$

式中 f_e 为电磁推力; m 为电机质量和负载质量总和; x_m 为电机输出位移; T_d 为外部扰动.

忽略直线电机的端部效应和齿槽效应带来的推力波动^[22,23],外部扰动主要为非线性摩擦力,由黏滞摩擦力和库仑摩擦力两部分组成^[24-26].

$$T_d(t) = \underbrace{b \frac{dx_m(t)}{dt}}_{\text{黏滞摩擦力}} + \underbrace{c \cdot \operatorname{sgn}\left[\frac{dx_m(t)}{dt}\right]}_{\text{库仑摩擦力}} \quad (2)$$

式中 b 、 c 为电机所受摩擦力的黏滞阻尼系数、库仑摩擦系数; $\operatorname{sgn}()$ 为符号函数,其表达式为

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1),电机输出位移 x_m 与电磁推力 f_e 的传

递函数为

$$G_p(s) = \frac{L[x_m(t)]}{L[f_e(t)]} = \frac{1}{ms^2} \quad (4)$$

根据式(2),非线性摩擦力 T_d 的频域表达式为

$$T_d(s) = bsX_m(s) + \frac{c}{s} \operatorname{sgn}[sX_m(s)] \quad (5)$$

式中 X_m 为电机输出位移频域表达式.

1.2 电机位移跟踪误差

为保证直线伺服系统的参考位移轨迹跟踪性能和系统鲁棒性,直线伺服系统常采用“前馈+反馈”2 自由度控制架构.在微米级直线伺服系统中,伺服系统的位置环闭环带宽(不大于 100 Hz)通常远低于数字采样频率(4 kHz).电流环滞后响应带来延迟时长约为 1 个数字采样周期.因此,数字控制周期及电流环响应滞后对直线伺服系统的实际影响可以忽略.另外,位置环反馈控制器采用 PID 结构,且通常将微分环节安排在反馈回路中.“前馈+PI-D 反馈”直线伺服系统整体控制结构如图 1 所示.

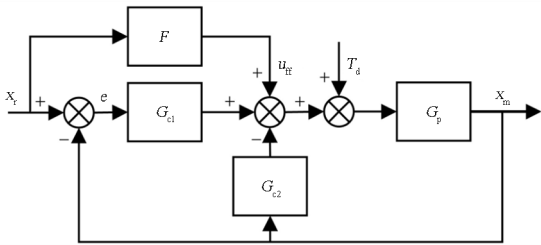


图 1 “前馈+PI-D 反馈”控制框图

Fig. 1 “Feed forward + PI-D feedback” control block diagram

图 1 中 F 为前馈控制器, x_r 为参考位移, e 为电机位移跟踪误差, u_{ff} 为前馈控制器输出, G_{c1} 和 G_{c2} 为反馈控制器,其表达式为

$$\begin{cases} G_{c1}(s) = k_p + k_i/s \\ G_{c2}(s) = k_d s \end{cases} \quad (6)$$

式中 k_p , k_i , k_d 为反馈控制器比例增益系数、积分增益系数、微分增益系数.反馈控制器各增益系数的具体数值共同决定了直线伺服系统的位置环闭环带宽,从而影响系统的稳定性和鲁棒性.反馈控制器各增益系数可根据传统根轨迹法设定.

在图 1 所示的“前馈+PI-D 反馈”控制架构下,电机输出位移 x_m 的频域表达式为

$$X_m(s) = S_p(F + G_{c1})X_r(s) - S_p T_d(s) \quad (7)$$

式中 X_r 为参考位移频域表达式; S_p 为扰动灵敏度

函数,其表达式为

$$S_p = \frac{G_p}{1 + G_p G_{c1} + G_p G_{c2}} \quad (8)$$

电机位移跟踪误差 e 的频域表达式为

$$\begin{aligned} E(s) &= X_r(s) - X_m(s) \\ &= \underbrace{S_p(G_p^{-1} + G_{c2} - F)X_r(s)}_{\text{参考位移产生的跟踪误差}} + \underbrace{S_p T_d(s)}_{\text{非线性摩擦产生的跟踪误差}} \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(9),在稳定运行的直线伺服系统中,不考虑位移传感器测量噪声带来的影响,以及直线电机的端部效应和齿槽效应带来的推力波动,电机位移跟踪误差由参考位移、非线性摩擦引起.

2 前馈控制器设计及参数迭代整定方法

根据以上分析,在确定性前馈控制器的作用下,前馈控制器参数的具体数值直接影响前馈控制器对电机位移跟踪误差的补偿效果.因此,迭代前馈整定包括前馈控制器设计和前馈参数迭代整定方法两部分.

2.1 前馈控制器设计

为便于前馈补偿,在高响应的直线伺服系统中,近似 $dx_m/dt = dx_r/dt$,即在频域内有 $sX_m(s) = sX_r(s)$, $\operatorname{sgn}[sX_m(s)] = \operatorname{sgn}[sX_r(s)]$.联合式(4)~(6),将非线性摩擦引起的电机位移跟踪误差和参考位移引起的电机位移跟踪误差联系起来,电机位移跟踪误差 e 的频域表达式可写为

$$\begin{aligned} E(s) &= S_p(k_d + b)sX_r(s) + S_p ms^2 X_r(s) + \\ &S_p \frac{c \cdot \operatorname{sgn}[sX_r(s)]}{s} - S_p F X_r(s) \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10),为使 $E(s) \rightarrow 0$,令前馈控制器输出 u_{ff} 的频域表达式为

$$\begin{aligned} U_{ff}(s) &= F X_r(s) \\ &= k_v s X_r(s) + k_a s^2 X_r(s) + \frac{k_f}{s} \operatorname{sgn}[sX_r(s)] \end{aligned} \quad (11)$$

式中 k_v , k_a , k_f 分别为速度前馈参数、加速度前馈参数、库仑摩擦前馈参数.当 $k_v \rightarrow (k_d + b)$, $k_a \rightarrow m$, $k_f \rightarrow c$,有 $E(s) \rightarrow 0$.

式(11)对应的前馈控制器输出 u_{ff} 时域表达式为

$$u_{ff}(t) = k_v \frac{d}{dt} x_r(t) + k_a \frac{d^2}{dt^2} x_r(t) + k_f \operatorname{sgn}\left[\frac{dx_r(t)}{dt}\right] \quad (12)$$

2.2 电机位移跟踪误差与误差分量相关性定义

联合式(10)和式(11),在前馈补偿作用下,电机位移跟踪误差 e 的频域表达式为

$$E(s) = S_p(k_d + b - k_v)sX_r(s) + S_p(m - k_a)s^2X_r(s) + S_p \frac{(c - k_f) \cdot \text{sgn}[sX_r(s)]}{s} \quad (13)$$

参考位移的能量主要集中低频段^[27]. 在频域内,有 $s \rightarrow 0$. 对于电机位移跟踪误差,速度前馈参数 k_v 整定不精准时,有

$$E(s) \approx S_p(k_d + b - k_v)sX_r(s) \quad (14)$$

速度前馈参数 k_v 整定精准后,加速度前馈参数 k_a 整定不精准时,有

$$E(s) \approx S_p(m - k_a)s^2X_r(s) \quad (15)$$

速度前馈参数 k_v 和加速度前馈参数 k_a 整定精准后,库仑摩擦前馈参数 k_f 整定不精准时,有

$$E(s) \approx S_p \frac{(c - k_f) \cdot \text{sgn}[sX_r(s)]}{s} \quad (16)$$

即前馈参数需按速度前馈参数 k_v 、加速度前馈参数 k_a 、库仑摩擦前馈参数 k_f 顺序整定. 故电机跟踪误差可以映射至参考位移一阶微分项(速度) v 、参考位移二阶微分项(加速度) a 、由参考位移一阶微分决定的符号函数项(库仑摩擦) f . 即有误差特征向量 Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 , 其具体表达式为

$$\begin{cases} \Psi_1 = \frac{dx_r}{dt} = v \\ \Psi_2 = \frac{d^2x_r}{dt^2} = a \\ \Psi_3 = \text{sgn}\left(\frac{dx_r}{dt}\right) = f \end{cases} \quad (17)$$

为量化误差相关性,依照皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient),定义电机位移跟踪误差与参考位移轨迹一阶微分项(速度)之间的相关系数 ρ_v 、电机位移跟踪误差与参考位移二阶微分项(加速度)之间的相关系数 ρ_a 、电机位移跟踪误差信号与参考位移一阶微分决定的符号函数项(库仑摩擦)之间的相关系数 ρ_f 分别为

$$\bar{e}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i, \bar{v}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \bar{f}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$$

$$\rho_v = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)(v_i - \bar{v}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}_i)^2}} \in [-1, 1]$$

$$\rho_a = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)(a_i - \bar{a}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a}_i)^2}} \in [-1, 1]$$

$$\rho_f = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)(f_i - \bar{f}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)^2}} \in [-1, 1] \quad (18)$$

式中 n 为信号向量的长度.

相关系数 $\rho_{v,a,f}$ 的数值表示电机位移跟踪误差 e 与误差特征向量 (Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3) 之间线性关系的强度和方向,具体数值对应含义如下表1所示.

表1 相关系数 $\rho_{v,a,f}$ 数值含义
Table 1 The significance of the values of $\rho_{v,a,f}$

Range of $\rho_{v,a,f}$	The relationship between e and Ψ
0.9 ~ 1.0	Very strong positive correlation
0.7 ~ 0.9	Strong positive correlation
0.5 ~ 0.7	Moderate positive correlation
0.3 ~ 0.5	Weak positive correlation
0.1 ~ 0.3	Very weak positive correlation
0.0	No correlation
-0.1 ~ -0.3	Very weak negative correlation
-0.3 ~ -0.5	Weak negative correlation
-0.5 ~ -0.7	Medium negative correlation
-0.7 ~ -0.9	Strong negative correlation
-0.9 ~ -1.0	Very strong negative correlation

2.3 基于相关系数更新的迭代前馈整定方法

结合式(14)~(18),前馈参数的整定质量直接影响电机位移跟踪误差的补偿效果,并直接反映在对应误差相关系数的数值上. 当误差相关系数呈现正相关时,该前馈参数对相应的误差特征向量的补偿程度不足. 当误差相关系数呈现负相关时,该前馈参数对所相应的误差特征向量的补偿过高. 当误差相关系数约为0时,该前馈参数对所相应的误差特征向量的补偿程度达到最佳状态. 因此,可以通过误差相关系数的更新计算,采用二分法进行各项前馈补偿参数的迭代整定,从而实现对直线伺服系

统位移跟踪误差的有效补偿. 基于相关系数更新的迭代前馈整定算法流程如表 2 所示.

表 2 基于相关系数更新的迭代前馈整定算法流程	
Table 2 Flow chart of iterative feedforward tuning algorithm based on correlation coefficient updating	
Step	Specific implementation content
1	Initialize $k_a, k_v, k_f=0$, number of iterations $i=0$
2	Set the maximum number of iterations to M , the allowable error boundary to p , and the correlation coefficient threshold to q_v, q_a, q_f
3	For $i < M$ (1) The motor does positioning motion. (2) Perform simultaneous acquisition of motor displacement tracking error e and feature vector v, a, f
4	Calculate and update each correlation coefficient ρ_v, ρ_a, ρ_f
5	if $ \rho_v > q_v$ then Change k_v by dichotomy
6	if $ \rho_a > q_a$ then Change k_a by dichotomy
7	if $ \rho_f > q_f$ then Change k_f by dichotomy
8	End if $i++$
9	if $\max(e) < p$ then End the iterative tuning of feedforward parameters
10	End if
11	End

3 方案验证

3.1 仿真验证

在 Simulink 中搭建如图 1 所示的“前馈+PI-D 反馈”直线伺服系统. 直线伺服系统的位置闭环带宽为 60 Hz. 位移反馈信号分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$. 参考位移采用 S 型曲线轨迹, 相关波形如图 2 所示. 仿真系统的电机参数、控制参数、参考位移参数设置如表 3 所示.

根据表 1 可知, 相关系数 $\rho_{v,a,f}$ 的绝对值越小, 说明电机位移跟踪误差与该误差特征向量相关性越弱, 对应前馈参数整定效果越好. 在基于相关系数更新的迭代前馈整定算法中, 需要预先设置合适的相关系数边界 $q_{v,a,f}$, 从而保证迭代前馈整定的补偿效果良好. 因为参考位移轨迹一阶微分项(速度) Ψ_1 和参考位移一阶微分决定的符号函数项(库仑摩擦) Ψ_3 形状相似, 但数量级不同. 故可选取 $q_{v,f}=0.2$, 在保证速度前馈参数、库仑摩擦前馈参数良好调节的基础上, 给速度前馈参数、库仑摩擦

前馈参数留有调节裕量. 选取 $q_a=0.05$, 能够精准调节加速度前馈系数. 继而, 能够依据表 2 所示的基于相关系数更新的迭代前馈整定算法, 按照速度前馈参数 k_v 、加速度前馈参数 k_a 、库仑摩擦前馈参数 k_f 顺序迭代整定.

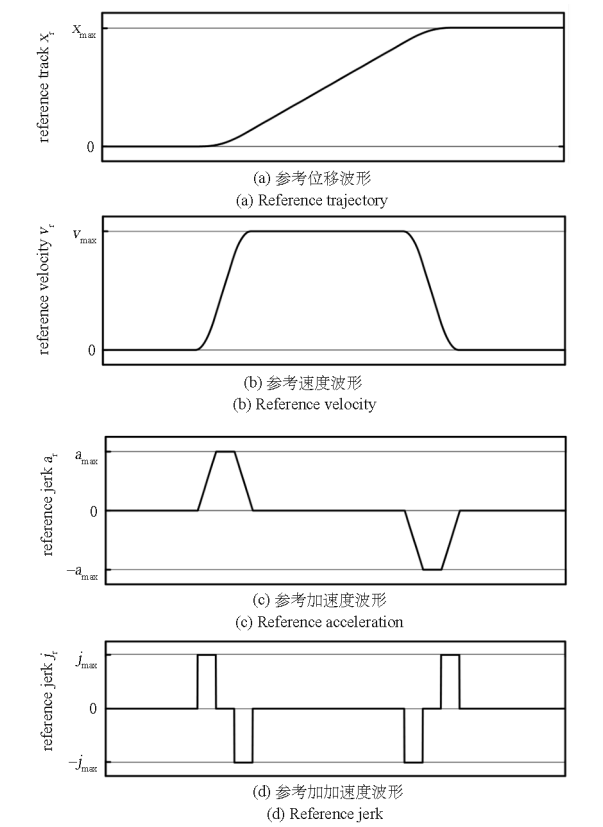


图 2 S 型曲线轨迹的相关波形
Fig. 2 Waveforms associated with S-curve trajectory

表 3 仿真系统参数		
Table 3 Parameters of simulation model		
Item	Value	Unit
The mass of the actor, m_m	1.1	kg
The mass of load, m_l	3.15	kg
Viscous damping coefficient, b	20	N·s/m
Coulomb friction coefficient, c	10	N
Thrust constant, K_T	10.355	N/A
Limit of current	12	A
Sampling period (position loop)	250	μs
Period of current lag	500	μs
Maximum displacement, $x_{\max}$	0.045	m
Maximum velocity, $v_{\max}$	0.2	m/s
Maximum acceleration, $a_{\max}$	5	m/s^2
Maximum jerk, $j_{\max}$	250	m/s^3

图 3 展示了按照表 2 进行迭代前馈整定时, 不同前馈参数整定情况下电机位移跟踪误差仿真结果.

由图 3(a)可得,当不采用前馈控制器($k_{v,a,f}=0$)时,电机位移跟踪误差与参考位移轨迹一阶微分项(速度)形状相似($\rho_v \approx 1$).由图 3(b)可得,当速度前馈参数整定良好($k_v=2180, k_{a,f}=0$)时,电机位移跟踪误差与参考位移轨迹二阶微分项(加速度)形状相似($\rho_v=0.18, \rho_a=0.97$).由图 3(c)可得,当速度,加速度前馈参数整定良好($k_v=2180, k_a=4, k_f=0$)时,电机位移跟踪误差与参考位移一阶微分决定的符号函数项(库仑摩擦)形状相似($\rho_v=0.82, \rho_a=0.01, \rho_f=0.93$).虽然 ρ_v 与 ρ_f 数值相似,但是电机位移跟踪误差在零速切换时刻的陡峭程度与库仑摩擦特征信号更接近.由图 3(d)可得,当前馈参数充分整定后($k_v=2180, k_a=4, k_f=$

10),电机位移跟踪误差几乎完全收敛,误差呈现噪声特性.此时电机位移跟踪误差信号与各误差分量特征向量几乎没有相关性($\rho_v=0.18, \rho_a=0.05, \rho_f=0.09$).这说明在表 2 所示的基于误差相关系数更新的迭代前馈整定作用下,电机位移跟踪误差明显降低.

上述仿真结果验证了直线伺服系统电机位移跟踪误差分析的正确性,以及基于误差相关系数更新进行迭代前馈整定的有效性.

3.2 实验验证

图 4 展示了微米级直线伺服运动平台.直线电机模组由智赢永磁同步直线电机、伺服控制器、高创驱动器以及雷尼绍光栅尺组成.智赢永磁同步直线电机参数如表 4 所示.直线伺服系统实验控制系统参数、参考位移相关参数、迭代前馈整定相关系数边界参数与仿真一致.雷尼绍光栅尺精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$.

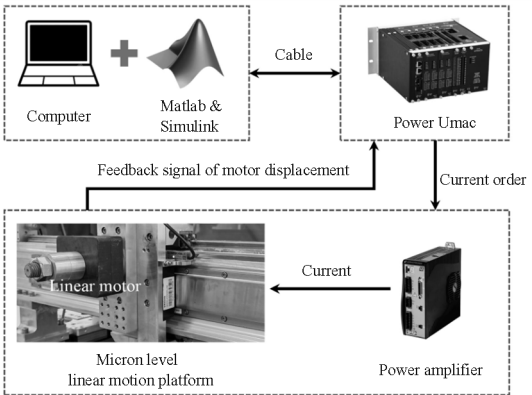


图 4 微米级直线运动实验平台
Fig. 4 Micron linear motion experimental platform

表 4 智赢永磁同步直线电机参数
Table 4 Parameters of Smartwin permanent magnet synchronous linear motor

Item	Value	Unit
Stator resistance, R_s	4.33	Ω
D-axis inductance, L_d	19.7	mH
Q-axis inductance, L_q	19.7	mH
The flux linkage of a permanent magnet, ψ_f	70.3	$\text{m}\cdot\text{Wb}$
Acion mass, m_m	1.1	kg
The mass of load, m_l	3.15	kg
Thrust constant, K_T	10.355	N/A
Rated voltage, V_n	220	V
Rated power, P_n	103.9	W
Limit of current	12	A

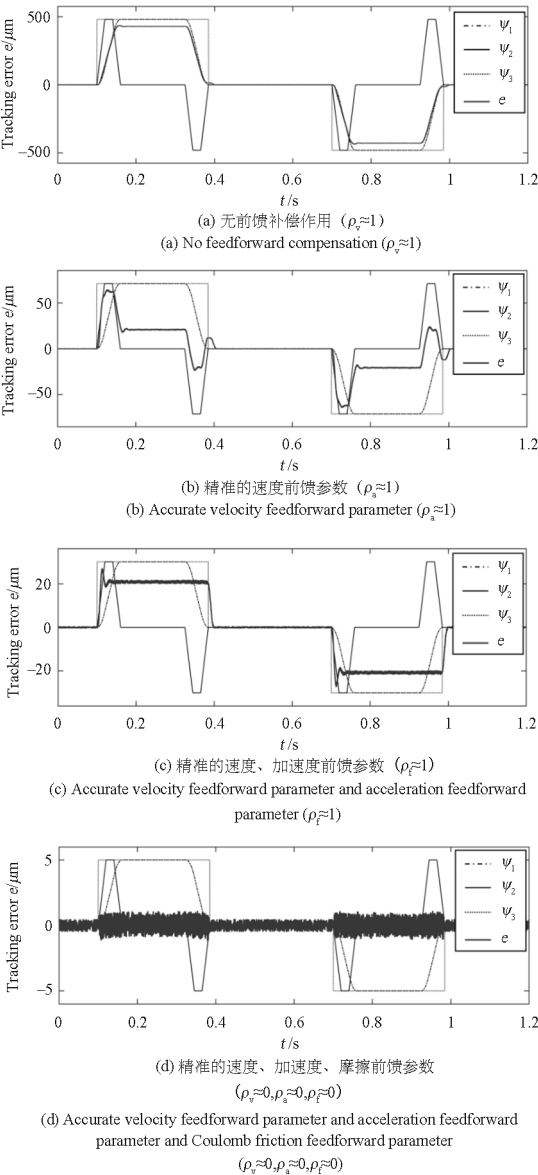


图 3 直线电机位移跟踪误差仿真结果
Fig. 3 Simulation results of displacement tracking error of the linear motor

图 5 展示了电机的实际运行速度波形图. 由图 5 可知, 直线伺服系统运行稳定.

图 6 展示了按照表 2 进行迭代前馈整定时, 不同前馈参数整定情况下电机位移跟踪误差实验结果. 由图 6(a)可得, 当不采用前馈控制器($k_{v,a,f}=0$)时, 电机位移跟踪误差与参考位移轨迹一阶微分项(速度)形状相似($\rho_v=0.98, \rho_a=-0.005, \rho_f=0.017$). 电机位移跟踪误差最大值为 $619\ \mu\text{m}$, 电机位移跟踪误差非零均方根值为 $447\ \mu\text{m}$. 由图 6(b)

可得, 当速度前馈参数整定良好($k_v=148\ 511, k_{a,f}=0$)时, 电机位移跟踪误差与参考位移轨迹二阶微分项(加速度)形状相似($\rho_v=0.16, \rho_a=0.63, \rho_f=0.15$). 电机位移跟踪误差最大值为 $71\ \mu\text{m}$, 电机位移跟踪误差非零均方根值为 $25\ \mu\text{m}$. 由图 6(c)可得, 当速度、加速度前馈参数整定良好($k_v=148\ 511, k_a=446, k_f=0$)时, 电机位移跟踪误差与参考位移一阶微分决定的符号函数项(库仑摩擦)形状相似($\rho_v=0.12, \rho_a=0.03, \rho_f=0.66$). 电机位移跟踪误差最大值为 $26\ \mu\text{m}$, 电机位移跟踪误差非零均方根值为 $17\ \mu\text{m}$. 由图 6(d)可得, 充分整定前馈参数($k_v=148\ 511, k_a=446, k_f=1011$)后, 电机位移跟踪误差最大值为 $7\ \mu\text{m}$, 电机位移跟踪误差非零均方根值为 $3\ \mu\text{m}$. 此时电机位移跟踪误差信号与各误差分量特征向量几乎没有相关性($\rho_v=0.06, \rho_a=0.03, \rho_f=-0.13$).

在不考虑直线电机齿槽效应和端部效应带来的推力波动的基础上, 上述实验结果与仿真结果存在一致性, 验证了直线伺服系统位移跟踪误差分析的正确性和迭代前馈整定方法的有效性. 为高性能直线伺服系统的前馈参数自动整定算法设计提供了理论基础.

4 结论

本文以受非线性摩擦力的直线伺服系统为研究对象, 针对非线性摩擦力带来的电机位移跟踪误差的量化与设计补偿困难的问题, 提出一种基于误差相关系数更新的迭代前馈整定策略. 相较于需要复杂模型的自适应鲁棒控制和需要大量数据的智能控制, 本文所设计的基于误差相关系数更新的迭代前馈整定策略采取较为简单的“黏滞摩擦+库仑摩擦”的非线性模型, 并将非线性摩擦力引起的电机位移跟踪误差与参考位移引起的电机位移跟踪误差联系起来, 结合迭代前馈整定的学习能力, 有效提高直线伺服系统的位移跟踪精度. 将基于误差相关系数更新的迭代前馈策略应用到受非线性摩擦的微米级直线运动实验平台上, 实验结果表明, 此策略显著降低了电机位移跟踪误差. 本文的研究可以用于受到非线性干扰的直线伺服系统电机位移跟踪误差分析与补偿, 简单有效地提高直线伺服系统电机位移跟踪精度, 具有良好的工程意义.

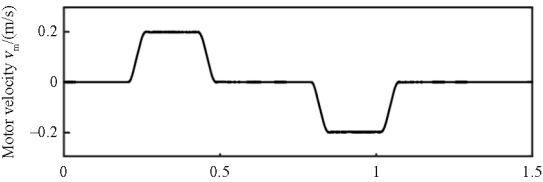
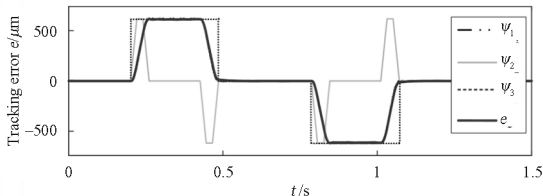
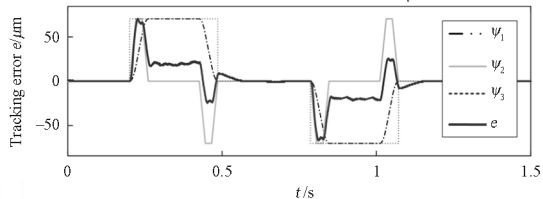


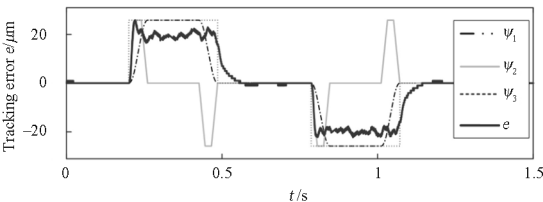
图 5 直线电机实际运行速度波形图
Fig. 5 The actual running velocity of the linear motor



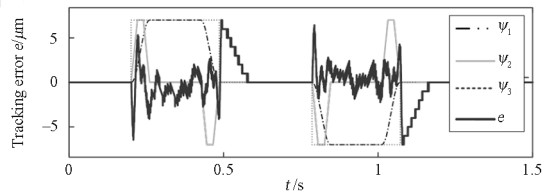
(a) 无前馈补偿作用 ($\rho_v \approx 1$)
(a) No feedforward compensation ($\rho_v \approx 1$)



(b) 精准的速度前馈参数 ($\rho_v \approx 1$)
(b) Accurate velocity feedforward parameter ($\rho_v \approx 1$)



(c) 精准的速度、加速度前馈参数 ($\rho_v \approx 1, \rho_a \approx 1$)
(c) Accurate velocity feedforward parameter and acceleration feedforward parameter ($\rho_v \approx 1, \rho_a \approx 1$)



(d) 精准的速度、加速度、摩擦前馈参数 ($\rho_v \approx 0, \rho_a \approx 0, \rho_f \approx 0$)
(d) Accurate velocity feedforward parameter and acceleration feedforward parameter and Coulomb friction feedforward parameter ($\rho_v \approx 0, \rho_a \approx 0, \rho_f \approx 0$)

图 6 直线电机位移跟踪误差实验结果
Fig. 6 Experimental results of displacement tracking error of the linear motor

参考文献

- [1] 赵政, 左思承, 魏尧, 等. 横向磁通永磁直线电机结构及其关键问题综述 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7806—7820.
ZHAO M, ZUO S C, WEI Y, et al. Overview of structure and key problems for transverse flux permanent magnet linear machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7806—7820. (in Chinese)
- [2] 周游, 石超杰, 曲荣海等. 磁场调制永磁直线电机拓扑研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1469—1484, 1552.
ZHOU Y, SHI C, QU R H, et al. Overview of flux-modulation linear permanent magnet machines [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2021, 41(4): 1469—1484, 1552. (in Chinese)
- [3] 沈懿明, 卢琴芬. 初级励磁型永磁直线电机研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2325—2343.
SHEN Y M, LU Q F. Overview of permanent magnet linear machines with primary excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2325—2343. (in Chinese)
- [4] 武志涛, 李帅, 程万胜. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁直线同步电机定结构滑模位置跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2503—2512.
WU Z T, LI S, CHENG W S. Fixed structure sliding mode position tracking control for permanent magnet linear synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2503—2512. (in Chinese)
- [5] IWASAKI M, SEKI K, MAEDA Y. High-precision motion control techniques: a promising approach to improving motion performance [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2012, 6(1): 32—40.
- [6] 宋法质, 刘杨. 精密运动系统迭代前馈控制方法及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2022.
SONG F Z, LIU Y. Iterative feedforward control with applications in precision motion systems [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2022. (in Chinese)
- [7] BUTLER H. Adaptive feedforward for a wafer stage in a lithographic tool [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 875—881.
- [8] 张彦龙. 永磁同步直线电机误差补偿及前馈控制技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
ZHANG Y L. The research of the error compensation and the technology of feedforward control for the permanent magnet synchronous linear motor [D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)
- [9] DAI L Y, LI X, ZHU Y, et al. Auto-tuning of model-based feedforward controller by feedback control signal in ultraprecision motion systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106764.
- [10] DAI L Y, LI X, ZHU Y, et al. Quantitative tracking error analysis and feedforward compensation under different model-based feedforward controllers in different control architectures [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 381—390.
- [11] DAI L Y, LI X, ZHU Y, et al. The generation mechanism of tracking error during acceleration or deceleration phase in ultraprecision motion systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7109—7119.
- [12] 戴录尧, 李鑫, 朱煜等. 超精密运动系统跟踪误差定量分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4910—4918, 4993.
DAI L Y, LI X, ZHU Y, et al. Quantitative analysis on tracking errors in ultra-precision motion systems [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2019, 39(16): 4910—4918, 4993. (in Chinese)
- [13] MARTON L, LANTOS B. Modeling, identification, and compensation of stick-slip friction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 511—521.
- [14] MARTON L. On analysis of limit cycles in positioning systems near Striebeck velocities [J]. Mechatronics, 2008, 18(1): 46—52.
- [15] 王瑞娟, 梅志千, 李向国等. 机电伺服系统非线性摩擦自适应补偿的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 123—129, 4.
WANG R J, MEI Z Q, LI X G, et al. Research on adaptive nonlinear friction compensation of mechatronic servo systems [J]. Proceedings of the Chinese

- Society of Electrical Engineering, 2012, 32(36): 123—129, 4. (in Chinese)
- [16] 方馨, 王丽梅, 张康. 基于扰动观测器的永磁直线电机高阶非奇异快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 409—421.
- [17] 罗刚, 王永富, 柴天佑, 等. 基于区间二型模糊摩擦补偿的鲁棒自适应控制[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1298—1306.
- LUO G, WANG Y F, CHAI T Y, et al. Robust adaptive control based on interval type-2 fuzzy friction compensation [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1298—1306. (in Chinese)
- [18] 赵希梅, 郭庆鼎. 为提高轮廓加工精度采用 DOB 和 ZPETC 的直线伺服鲁棒跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 111—114, 126.
- ZHAO X M, GUO Q D. Linear servo robust tracking control based on DOB and ZPETC to improve the contour machining precision [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6): 111—114, 126. (in Chinese)
- [19] LU L, YAO B, WANG Q F, et al. Adaptive robust control of linear motor systems with dynamic friction compensation using modified LuGre Model [C]//2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. New York: IEEE, 2008: 961—966.
- [20] FREIDOVICH L, ROBERTSSON A, SHIRIAEV A, et al. LuGre-model-based friction compensation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(1): 194—200.
- [21] 魏惠芳, 王丽梅. 永磁直线同步电机自适应模糊神经网络时变滑模控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 861—869.
- WEI H F, WANG L M. Adaptive fuzzy neural network time-varying sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 861—869. (in Chinese)
- [22] SONG F Z, LIU Y, XU J X, et al. Iterative learning identification and compensation of space-periodic disturbance in PMLSM systems with time delay [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7579—7589.
- [23] SONG F Z, LIU Y, XU J X, et al. Data-driven iterative feedforward tuning for a wafer stage: a high-order approach based on instrumental variables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3106—3116.
- [24] BOEREN F, OOMEN T, STEINBUCH M. Accuracy aspects in motion feedforward tuning [C]//2014 American Control Conference. New York: IEEE, 2014: 2178—2183.
- [25] ARMSTRONG-HELOUVRY B. Control of machines with friction [M]. New York: Springer, 2012.
- [26] WANG S Z, HONG L, JIANG J. Characteristics of stick-slip oscillations in dry friction backward whirl of piecewise smooth rotor/stator rubbing systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106387.
- [27] TUNG E D, TOMIZUKA M. Feedforward tracking controller design for high-speed motion control [J]. IFAC Proceedings Volumes, 1993, 26(2): 299—302.