

基于前馈跟踪补偿的精锻机空心锻芯棒电液伺服运动控制方法

蔺素宏^{1,2}, 寇艳艳³, 雷丙旺³

(1. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030000; 2. 太原理工大学 先进成形与智能装备研究院, 山西 太原 030000;
3. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古自治区 包头 014030)

摘要: 为了解决精锻机芯棒小车马达在启动时存在较大振动冲击的问题, 系统分析了精锻机芯棒运动电液伺服控制原理; 建立了电液伺服系统各个元件的数学模型, 利用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了芯棒运动小车电液伺服控制仿真模型; 分别设计了芯棒小车的运动控制器, 以及基于前馈跟踪补偿的电液伺服闭环控制器。仿真与试验结果表明: 基于前馈跟踪补偿的电液伺服运动控制算法可以控制芯棒小车平稳运行, 解决了小车启动时芯棒冲击的问题; 速度前馈的引入可有效减少位移跟踪误差; 对比不同速度前馈系数下的跟踪误差, 发现当速度前馈系数为 0.5 时, 系统的跟踪误差最小, 控制效果最佳。

关键词: 精锻机; 振动冲击; 速度前馈; PI 控制算法; 定位精度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.020

中图分类号: TG315.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 03-0170-06

Electro-hydraulic servo motion control method for hollow forging mandrel of precision forging press based on feedforward tracking compensation

Lin Suhong^{1,2}, Kou Yanyan³, Lei Bingwang³

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China;
2. Advanced Forming and Intelligent Equipment Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China;
3. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou 014030, China)

Abstract: For the problem of significant vibration and impact in the motor of precision forging press mandrel trolley during startup, the electro-hydraulic servo control mechanism for mandrel movement in the precision forging press was systematically analyzed. Mathematical models of each component in the electro-hydraulic servo system were established. A simulation model for electro-hydraulic servo system of the mandrel movement trolley was developed using the Matlab/Simulink simulation platform. The motion controller of the mandrel trolley and the electro-hydraulic servo closed-loop controller based on feedforward tracking compensation were respectively designed. Simulation and experimental results demonstrate that the electro-hydraulic servo motion control algorithm based on feedforward tracking compensation can control the mandrel trolley to run smoothly, thus solving the problem of mandrel impact during trolley startup. The implementation of speed feedforward significantly reduces the displacement tracking errors. By comparing the tracking errors under different speed feedforward coefficients, it is found that when the speed feedforward coefficient is 0.5, the tracking error of the system is the smallest and the control effect is the best.

Key words: precision forging press; vibration and impact; speed feedforward; PI control algorithm; positioning accuracy

精锻机是冶金生产中一种重要的设备, 其锻造效率高、变形温降小、表面粗糙度低, 用于加工轴类实心、空心锻件^[1]。国外对径向锻造技术的研究较早且较成熟, 奥地利 GFM、德国 SMS 和意大利 Danieli 等厂商处于垄断地位^[2-3]。目前国内有一些

学者研究径向锻压工艺^[2,4-8], 有一些学者对径向锻造机锤头的液压系统进行了深入研究分析^[9-12], 然而没有人对芯棒小车的电液伺服系统进行深入研究。

本文的研究对象是奥地利 GFM 公司提供的 RF-70 式径向精锻机, 该设备是锻造生产线上的关键设备, 其工作原理为: 锭坯 (或空心管坯) 分别由上料和下料夹头夹持, 夹头作水平移动及旋转 (锻打矩形件时不旋转), 依靠两对锤头同时快速对击和芯棒的平衡砧作用, 可以在一次行程中锻成不等截面的薄厚壁管。管坯锻件尺寸技术参数如表 1 所示。

收稿日期: 2024-12-30; 修订日期: 2025-03-05

基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2022208A002)

作者简介: 蔺素宏 (1990-), 男, 博士, 实验师

E-mail: linsuhong@tyut.edu.cn

表1 管坯锻件尺寸 (mm)

Table 1 Dimensions of pipe billet forgings (mm)

参数	数值
坯料最大直径	Φ600
管坯内径 (最小) / 外径 (最大)	Φ60/Φ500
最大长度	4000
最小长度	1200

1 芯棒运动系统组成及原理

芯棒小车运动系统主要由芯棒小车、导轨、液压马达、链条、高频响比例伺服阀和位移传感器组成。在锻造前，芯棒小车需要将芯棒快速、准确地送到某一固定位置（前后端位），在锻造时，驱动芯棒小车的液压马达处于浮动状态，此时芯棒油缸与芯棒小车通过锁紧机构锁紧后驱动芯棒前进与后退，与主锤头配合实现空心锻造。芯棒小车运动系统的传动及液压原理图如图1所示。使用位移传感器测量小车的实际位移。浮动阀用来将马达两个油口连通，使马达处于浮动状态。安全阀1和安全阀2用来限制马达的扭矩，起到安全保护作用。高频响比例伺服阀用来控制液压马达的转速。液压马达采用低速大扭矩 JMDG 型柱塞马达，其排量为 1800 cm³，设定工作压力为 14 MPa。液压马达通过链条将旋转运动转换为直线运动驱动芯棒小车运动。位移传感器用来检测芯棒小车的实际运动位置，通过闭环控制算法给出需要调整的伺服阀开口量，通过伺服阀来控制液压马达的转速，从而控制芯棒小车的位置，其控制流程如图2所示。

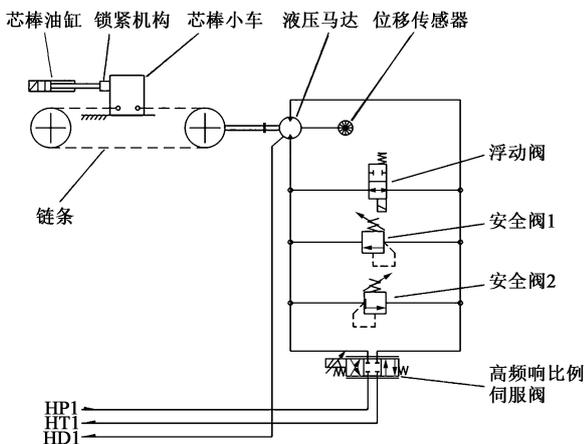


图1 传动及液压原理图

Fig. 1 Principle diagram of transmission and hydraulics

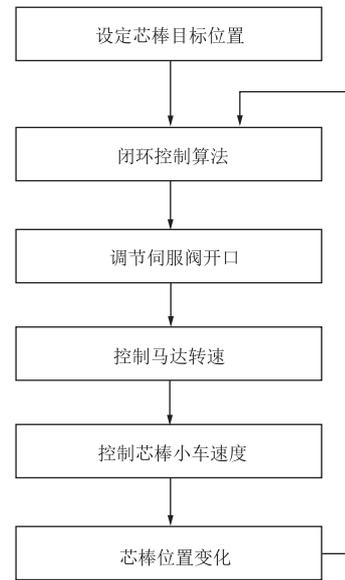


图2 芯棒运动控制流程图

Fig. 2 Flow chart of mandrel motion control

2 数学模型

液压马达通过链条驱动芯棒小车运动，由机械结构可知液压马达转轴的角度与芯棒小车的位移有如下关系：

$$y = \frac{1}{2} \theta d \tag{1}$$

式中： θ 为液压马达的输出轴转角； d 为链轮直径； y 为芯棒小车的位移。

在液压马达输出轴上存在的力矩平衡关系如下：

$$P_L D_m = J_t \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B_m \frac{d \theta}{dt} + G \theta + T_L \tag{2}$$

式中： P_L 为负载压力； D_m 为液压马达的排量； J_t 为芯棒、芯棒小车、链条和链轮等折算到液压马达输出轴上的惯量； B_m 为粘性阻尼系数； G 为等效扭转弹簧的弹簧刚度； T_L 为马达输出轴上的负载扭矩； t 为时间。

用来控制液压马达的阀为直动式高频响比例阀，通过该阀口的流量与阀口压降和阀口开口量有关，工作时，阀芯在工作点附近来回运动，实现对芯棒小车位置的调节。高频响比例阀口流量 Q_L 的线性化方程为：

$$Q_L = K_q X_V - K_c P_L \tag{3}$$

式中： K_q 为阀的流量增益； K_c 为阀的流量压力系数； X_V 为高频响比例伺服阀阀芯位移。

驱动芯棒小车的液压马达为径向柱塞式马达，

其内部的柱塞、缸体和配流盘等结构之间存在微小间隙,会导致油液内泄,其内泄流量与负载压力有关。流入液压马达的流量与马达排出的流量以及泄漏流量存在以下关系:

$$Q_L = D_m \frac{d\theta}{dt} + \frac{V_l}{4\beta_e} \frac{dP_L}{dt} + Q_{lm} \quad (4)$$

式中: D_m 为包括负载折算的液压马达输出轴的惯量; β_e 为油液的弹性模量; V_l 为液压阀与马达之间的容腔总和; Q_{lm} 为液压马达的内泄流量, $Q_{lm} = C_{lm}P_L$; C_{lm} 为马达内部总泄漏系数。

在芯棒小车电液伺服系统中,高频响比例伺服阀用来调节液压马达的流量。由于高频响比例阀的响应频率高于电液伺服系统的固有频率,因此,在建模分析时可以将高频响比例阀视为一阶惯性环节,其传递函数 G_{sv} 为:

$$G_{sv} = \frac{X_v}{U} = \frac{K_{sv}}{T_s s + 1} \quad (5)$$

式中: K_{sv} 为阀的增益; T_s 为阀的时间常数; U 为阀的输入信号; s 为拉普拉斯算子。

整理式 (1) ~ 式 (5), 并且分别进行拉氏变换, 可得芯棒小车位移与高频响比例伺服阀阀芯位移的传递函数为:

$$\frac{y}{X_v} = \frac{\frac{K_q d}{D_m}}{2s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2 \frac{\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (6)$$

式中: $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e D_m^2}{V_l J_t}}$; $\zeta_h = \frac{K_{ce}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_t}{V_l}} + \frac{B_m}{4D_m} \sqrt{\frac{V_l}{\beta_e J_t}}$; K_{ce} 为总流量压力系数, $K_{ce} = K_c + C_{lm}$ 。

由式 (6) 可得到芯棒小车电液伺服系统的方框图如图 3 所示。

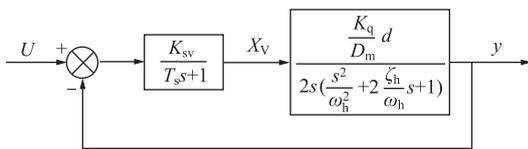


图 3 芯棒小车电液伺服系统方框图

Fig. 3 Block diagram of electro-hydraulic servo system for mandrel trolley

3 基于前馈跟踪补偿的运动控制方法

3.1 参考曲线生成器

为了使芯棒小车在启动和停止时运动平稳无冲击, 平稳的位移轨迹参考曲线是必备的。参考曲线

生成器的作用是生成一条位移、速度、加速度可控的参考位移曲线。在运动过程中, 被控对象经历匀加速-匀速-匀减速 3 个阶段, 其位移、速度和加速度曲线如图 4 所示。

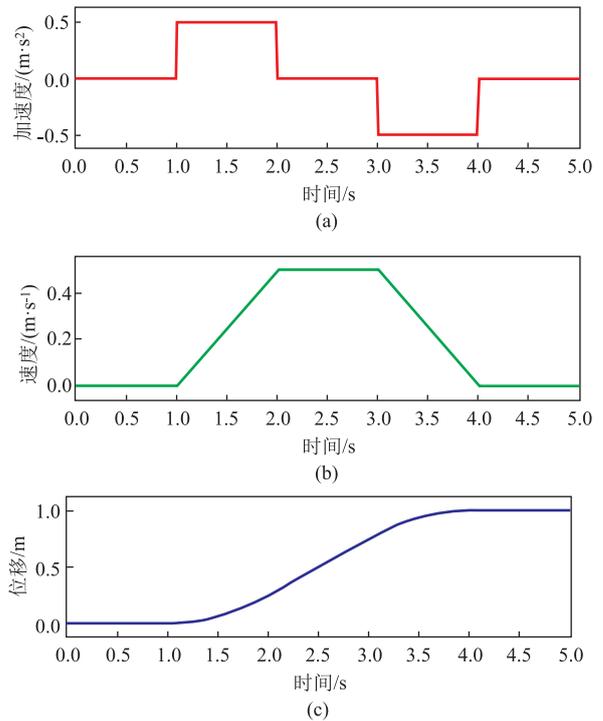


图 4 芯棒小车的位移 (a)、速度 (b)、加速度 (c) 曲线

Fig. 4 Displacement (a), speed (b) and acceleration (c) curves of mandrel trolley

给定末端位移 S , 以及速度极限 V_{max} 、加速度 a_{max} , 则可生成运动参考曲线。根据最大速度 V_{max} 是否可以达到, 可分为以下两种情况。

情况 1: 若 $S < \frac{V_{max}^2}{2a_{max}}$, 则达不到最大速度 V_{max} ,

此时不存在匀速阶段, 可以达到的最大速度为 $V_{max1} = \sqrt{2a_{max}S}$ 。生成运动参考曲线的步骤为:

(1) 第 1 步, 计算匀加速阶段的位移。小车的加速阶段结束时间 $t_1 = \frac{V_{max1}}{a_{max}}$, 减速阶段结束时间为

$t_3 = 2 \cdot \frac{V_{max1}}{a_{max}}$, 则在匀加速阶段末小车的位移 $S_1 =$

$\frac{1}{2} a_{max} t^2$, 速度 $v = a_{max} t, 0 \leq t \leq t_1$ 。由于无法达到最大速度, 当速度达到 V_{max1} 时, 直接进入匀减速阶段;

(2) 第 2 步, 计算匀减速阶段的位移。在匀减

速阶段内, 小车的位移 $S = S_1 + \frac{1}{2} a_{max} (t_3 - t)^2, v = V_{max} -$

$a_{\max}(t-t_1)$, $t_1 < t \leq t_3$ 。

情况 2: 若 $S > \frac{V_{\max}^2}{2a_{\max}}$, 则存在最大速度 V_{\max} 。生成运动参考曲线的步骤为:

(1) 第 1 步: 计算匀加速阶段结束时间, $t_1 = \frac{V_{\max}}{a_{\max}}$ 。在匀加速阶段内, $S_1 = \frac{1}{2} a_{\max} t^2$, $v = a_{\max} t$, $0 \leq t \leq t_1$;

(2) 第 2 步: 计算匀速阶段结束时间, $t_2 = \frac{S}{\frac{V_{\max}}{a_{\max}} + t_1}$ 。在匀速阶段内, 小车的位移 $S_2 = S_1 + V_{\max} \times (t-t_1)$, $v = v_{\max}$, $t_1 < t < t_2$;

(3) 第 3 步, 计算匀减速阶段结束时间, $t_3 = t_2 + \frac{V_{\max}}{a_{\max}}$ 。在匀减速阶段内, 小车的位移 $S_3 = S_2 + \frac{1}{2} \times$

$a_{\max}(t_3-t_2)^2 - \frac{1}{2} a_{\max} \times (t_3-t)^2$, $v = V_{\max} - a_{\max}(t-t_2)$, $t_2 \leq t \leq t_3$ 。

3.2 带有速度前馈补偿的 PI 控制算法

比例积分 (Proportional-Integral, PI) 控制是工业控制中常用的控制算法。其优点是控制器结构清晰, 参数简单、容易调试。搭建带有速度前馈补偿功能和抗积分饱和功能的 PI 控制结构如图 5 所示, 其中, 指令位移信号来自参考曲线生成器给出的实时位移信号, 指令速度信号来自参考曲线生成器给出的实时速度信号, K_p 和 K_i 分别为控制器的比例参数和积分参数, K_{ff} 为速度前馈系数。图 5 中控制器输出包含有两部分: 速度前馈部分和 PI 控制部分。控制器输出环节里设置有饱和和检测模块, 当输出达到饱和时可以及时屏蔽比例积分环节, 避免由于误差过大导致输出饱和现象, 实现抗饱和功能。

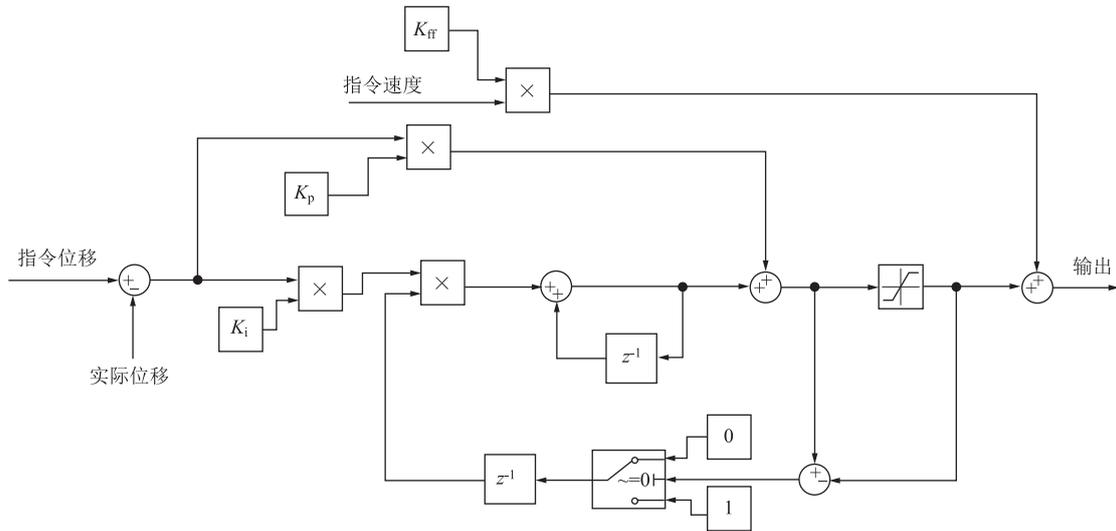


图 5 带有速度前馈补偿的 PI 控制算法

Fig. 5 PI control algorithm with speed feedforward compensation

4 仿真分析及试验验证

4.1 仿真分析

依据章节 3 中得出的系统模型, 在 Matlab/Simulink 里建模搭建仿真模型, 如图 6 所示。仿真时, 设置的参数如表 2 所示。

控制器采用标准比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 控制, 并且采用 Simulink 中 PID 参数自整定功能, 整定后参数 $K_p = 1.63$, $K_i = 3.32$, $K_d = 0.163$ (K_d 为微分参数)。小车的指令位移信号在 1 s 时设置为 50 mm, 此时小车

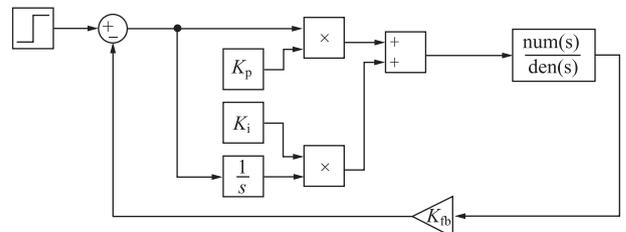


图 6 系统仿真模型

Fig. 6 System simulation model

迅速移动, 小车的指令位移信号和实际位移信号如图 7 所示, 可以看到小车在启动时存在波动和冲击现象。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值
链轮直径 d/mm	$\Phi 510$
供油压力 P_s/MPa	26
阀的流量增益 $K_q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA})$	20×10^{-6}
总流量压力系数 $K_{cc}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa})$	1.2×10^{-11}
液压马达排量 $D_m/(\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1})$	250×10^{-6}
伺服阀时间常数 T_s/s	1.5×10^{-3}
油液弹性模量 β_e/Pa	0.8×10^9

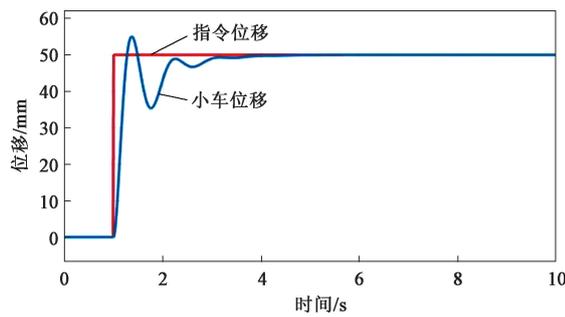


图 7 小车指令位移和实际位移曲线

Fig. 7 Curves of command and actual displacements for trolley

4.2 试验验证

在精锻机的芯棒小车液压系统上进行试验验证。试验装置如图 8 所示。在 PLC 内将所提的基于前馈跟踪补偿的运动控制方法写成一个功能块，并且将控制芯棒小车的伺服阀信号以及小车的位移传感器信号接入 PLC 控制系统中进行测试。由于现场存在较强的电磁干扰，在 PLC 内部将位移传感器通道的滤波功能打开，从而抑制高频干扰并且平滑位移曲线。测试时，每隔 10 ms 调用一次算法功能块，同时记录一次数据。

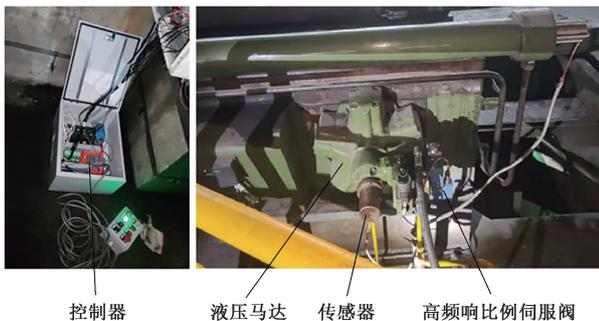


图 8 试验装置

Fig. 8 Test device

首先验证参考曲线生成器的输出。设置芯棒小车的加速度 $a_{\max} = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，芯棒小车的最大速度 $V_{\max} = 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，向 PLC 控制系统发出芯棒小车移动 500 mm 的指令，芯棒小车从当前位置开始运动，分别经过匀加速、匀速、匀减速过程，最终停在 500 mm 左右的位置，运动过程中记录的数据如图 9 所示。

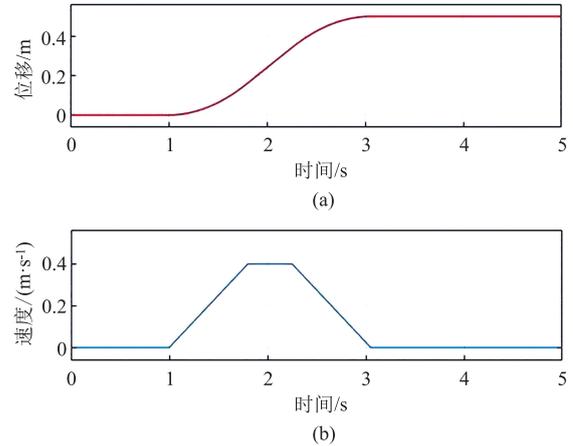


图 9 参考曲线生成器输出的指令位移 (a) 和指令速度 (b) 信号图

Fig. 9 Signal diagrams of command displacement (a) and command speed (b) output by reference curve generator

可见参考曲线生成器给出了芯棒小车从当前位置移动到 500 mm 位置的一段平滑的参考位移曲线，其加速阶段用时 0.8 s，匀速阶段用时 0.45 s，减速阶段用时 0.8 s，与理论推导吻合。芯棒小车的实际位移曲线和参考位移曲线如图 10 所示。可见在运动过程中芯棒小车位移平稳，无冲击、波动现象。

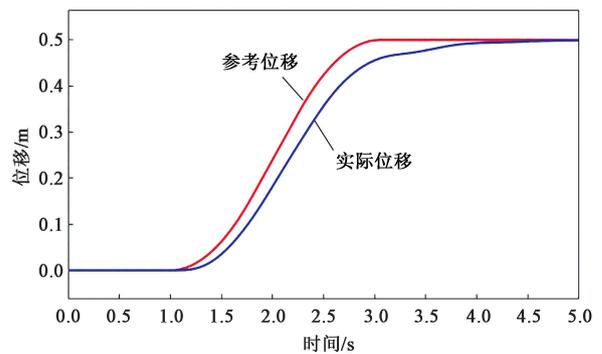


图 10 小车的实际位移曲线和参考位移曲线

Fig. 10 Actual and reference displacement curves of trolley

试验时，分别测试了前馈系数 K_{ff} 分别为 0、0.3、0.5 和 0.7 时芯棒小车的位移跟随情况，位移跟随误差如图 11 所示。前馈 K_{ff} 为 0 时，意味着速度前馈功能关闭，图 9 中可以对比得出此时的位

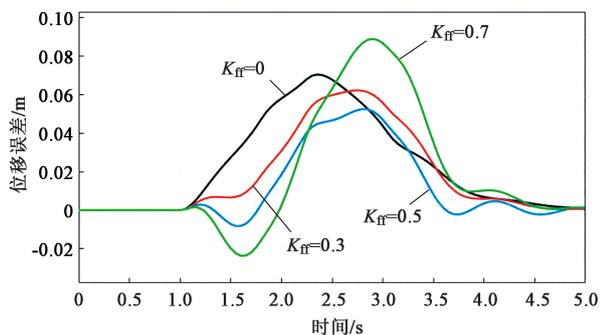


图 11 不同速度前馈系数下跟踪误差比较

Fig. 11 Comparison of tracking errors under different speed feedforward coefficients

移跟踪误差较大。当 K_{ff} 为 0.5 时跟踪误差最小; 当 K_{ff} 为 0.7 时, 跟踪误差反而变大, 说明补偿过度。对比可知, 速度前馈系数 K_{ff} 为 0.5 时较为合适。

5 结论

本文针对精锻机空心锻芯棒马达启动时产生较大冲击的问题, 提出了一种基于前馈跟踪补偿的控制方法, 并通过仿真与试验验证了该方法的有效性。具体结论如下:

(1) 本文设计的参考曲线生成器能够根据目标位移产生平滑的位移、速度加速度曲线, 有效解决了芯棒小车在启动时的冲击、波动问题。

(2) 试验结果表明, 通过引入速度前馈补偿, 系统能够有效减少位移跟踪误差, 提高了定位精度。

(3) 通过试验对比不同速度前馈系数下的跟踪误差发现, 当速度前馈系数为 0.5 时, 系统的跟踪误差最小, 控制效果最佳。

参考文献:

[1] 马鹏举, 兰小龙, 王文杰, 等. 精锻机关键动作协作分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 176-185.
Ma P J, Lan X L, Wang W J, et al. Cooperation analysis on key actions for precision forging press [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 176-185.

[2] 杨震, 王炳正, 宋道春, 等. 径向锻造设备与工艺综述 [J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53 (6): 27-30.
Yang Z, Wang B Z, Song D C, et al. Overview of radial forging equipment and process [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53 (6): 27-30.

[3] 林永新. 锻造设备制造技术的发展 [J]. 中国材料进展, 2004 (12): 7-9.

Lin Y X. The development of forging equipment manufacturing technology [J]. Material China, 2004 (12): 7-9.

[4] 栾谦聪, 董湘怀, 吴云剑. 径向锻造工艺参数对锻透性的影响 [J]. 中国机械工程, 2014, 25 (22): 3098-3103.
Luan Q C, Dong X H, Wu Y J. Effects of process parameters on fpe in radial forging processes [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25 (22): 3098-3103.

[5] 刘力力. 身管径向锻造工艺及锻后身管性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Liu L L. Study on Radial Forging Process of Barrel and Properties of Forged Barrel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.

[6] 甘国强, 李萍, 薛克敏. 汽车件高强铝合金板件热冲压工艺研究进展 [J]. 稀有金属, 2024, 48 (4): 564-574.
Gan G Q, Li P, Xue K M. Research progress on hot stamping process of high strength aluminum alloy plates for automotive parts [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48 (4): 564-574.

[7] 孔永华, 胡华斌, 李龙, 等. GH4169 合金不同锻造工艺的组织与性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40 (S2): 225-228.
Kong Y H, Hu H B, Li L, et al. Study on the microstructures and properties of GH4169 alloy by different forging technology [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40 (S2): 225-228.

[8] 徐伟生. 冷径向锻造高强钢管组织结构与残余应力研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
Xu W S. Study on Microstructure and Residual Stress of Cold Radial Forged High-strength Steel Tube [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.

[9] 钟雨萍. 10 MN 液压精锻机锻造箱的结构优化设计 [J]. 机械设计, 2011, 28 (3): 88-91.
Zhong L P. Structure optimization research of forging box of 10 MN precision hydraulic forging machine [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28 (3): 88-91.

[10] 张超, 赵升吨, 母东. 航空锻件用径向锻机液压驱动方式合理性探讨 [J]. 液压与气动, 2014, 274 (6): 13-16.
Zhang C, Zhao S D, Mu D. Study of hydraulic driving radial forging machine for aeronautic products [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014, 274 (6): 13-16.

[11] 张昊. 16 MN 全液压式径锻机主机液压系统静动态特性的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
Zhang H. Study on the Static and Dynamic Characteristics of the Hydraulic System of the 16 MN Radial Forging Machine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.

[12] 陈殿领. 利用西门子电气对 1400 t 精锻机进行电气及数控化改造 [J]. 制造技术与机床, 2011, 590 (9): 133-135, 150.
Chen D L. The electrical and NC transformation for 1400 t precision forging machine using SIEMENS electric [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011, 590 (9): 133-135, 150.