

液压挤压机挤压速度的预测控制^①

彭 辉

(中南工业大学信息工程学院, 长沙 410083)

彭晓燕

(湖南大学机械与汽车工程学院, 长沙 410082)

魏 亮

曹显跃

(西南铝加工厂锻造分厂, 重庆 631326)

摘 要 用 CARIMA 模型描述液压挤压机柱塞行进速度与节流阀驱动步进电机控制脉冲之间的关系, 采用广义预测控制(GPC)算法控制挤压速度, 使其跟踪速度引导曲线以实现模拟等温挤压。仿真实验表明, 采用 GPC 算法能使挤压速度精确跟踪设定曲线, 并能有效抑制对象参数时变、突加恒值干扰及随机干扰的影响。

关键词 液压挤压机 挤压速度控制 CARIMA 模型 GPC 算法

液压挤压机是生产金属管、棒、型或线材的主要设备, 挤压制品广泛应用于航空、电力、造船、交通及建材等工业部门。为了保证挤压制品的优质高产, 压机的挤压速度控制是极为重要的。执行等温挤压工艺, 即维持挤压件经过出模口时温度恒定, 可使挤压件纵向组织结构和机械特性均匀, 改善金属流动条件并可提高生产率^[1]。采用控制挤压速度的方法可实现等温挤压, 但当出模口挤压件温度难以测量时, 亦可根据坯锭温度、尺寸和机械性能等参数制定出一个挤压速度规范(速度给定曲线), 使实际挤压速度按此规范执行以达到近似的等温挤压^[2, 3], 这就是现在普遍采用的模拟等温挤压方式。目前, 国内外采用模拟等温挤压工艺的挤压机速度控制系统中都采用 PI^[4]或 PID 调节器^[5], 由于挤压机为参数时变对象, 故难以保证调节品质。

本文将对参数时变、突加恒值干扰及随机干扰具有很强适应性的 GPC 算法用于挤压速度控制, 给出了减少运算量的实现方法、由模拟等温挤压速度规范到速度引导曲线的转换、以及 GPC 参考轨迹的计算方法, 最后对一实例进行了仿真研究。

1 系统结构与对象模型

采用 GPC 算法实现模拟等温挤压的控制结构如图 1 所示。挤压速度规范由操作人员输入, 速度引导曲线、参考轨迹计算、GPC 运算由工控计算机执行。GPC 得出的控制量 u 被转换成步进电机的控制脉冲数, 通过减速机构、螺旋传动件、液压放大器, 控制节流阀的开口度, 调节主柱塞行进速度即挤压速度。挤压速度 y 先由光电脉冲发生器转换成脉冲频率, 再经计数装置及工控机计算出实时挤压速度, 经累加可得挤压行程 x 。

将步进电机、中间机构及主柱塞看作 GPC 的广义被控对象。步进电机的特性可用积分环节表示, 各中间机构及主柱塞的特性可用一变系数惯性环节描述^[3], 因而广义对象传函为

$$G_p(s) = \frac{K_m}{s(1 + T_ms)} \quad (1)$$

式中 K_m 是各机构综合比例系数, T_m 是液压回路惯性时间常数, K_m 、 T_m 与主柱塞位移及挤压速度变化率有关, 是时变参数。

设采样周期为 T_c , 将式(1)离散化, 得

① 收稿日期: 1995-11-20; 修回日期: 1996-05-23 彭辉, 男, 33岁, 副教授, 硕士

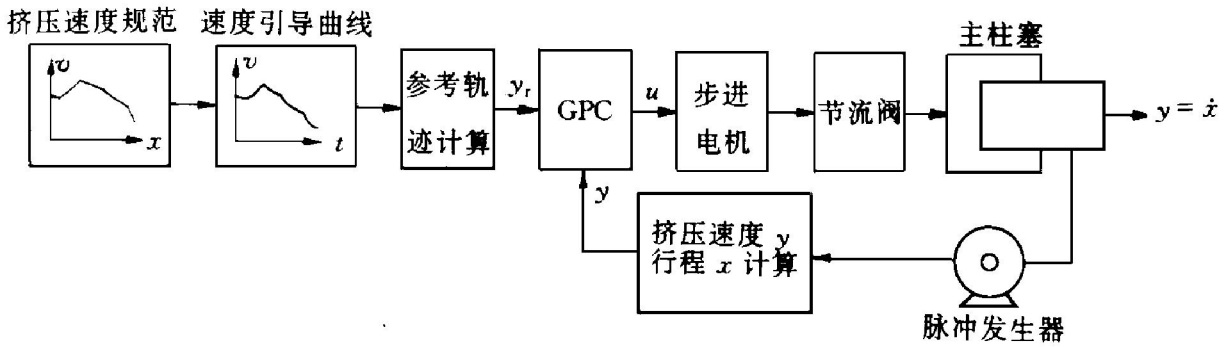


图1 挤压速度控制系统结构图

$$G_p(z) = Z^{-1} \left[\frac{1 - e^{-T_c s}}{s} \cdot \frac{K_m}{s(1 + T_m s)} \right] \\ = \frac{b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= K_m \left[T_c - T_m + T_m \exp\left(-\frac{T_c}{T_m}\right) \right]; \\ b_1 &= K_m \left[T_m - T_m \exp\left(-\frac{T_c}{T_m}\right) - \right. \\ &\quad \left. T_c \exp\left(-\frac{T_c}{T_m}\right) \right] (3) \\ a_1 &= - \left[(1 + \exp\left(-\frac{T_c}{T_m}\right)) \right]; \\ a_2 &= \exp\left(-\frac{T_c}{T_m}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

考虑到恒值干扰及随机干扰的影响, 采用 CARIMA 模型描述广义对象特性

$$Ay(k) = Bu(k-1) + C\xi(k)/\Delta \quad (4)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= 1 - z^{-1} \\ A &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \\ B &= b_0 + b_1 z^{-1} \\ C &\text{为噪声多项式} \\ \xi(k) &\text{为零均值白噪声干扰} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2 GPC 算法

取目标函数为

$$J = \sum_{j=1}^N [\hat{y}(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \mu \sum_{j=1}^{Nu} [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (6)$$

式中 N, Nu, μ 分别为预测长度, 控制长度, 控制加权系数。 $\{y_r(k)\}$ 是柔化的参考轨迹序列, 由下式产生

$$\left. \begin{aligned} y_r(k) &= y(k) \\ y_r(k+j) &= \alpha y_r(k+j-1) + \\ &\quad (1-\alpha)v(k+j) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$j = 1, 2, \dots, N$

柔化因子 $0 \leq \alpha < 1$, $\{v(k)\}$ 是由挤压速度规范转换来的速度给定值序列。 $\hat{y}(k+j)$ 是挤压速度 $y(k)$ 的向前 j 步最优预测, 它满足下式

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}(k+j) &= y_1(k+j) + \\ &\quad F_j \Delta u(k+j-1) \\ y_1(k+j) &= G_j y_1(k) + \\ &\quad \Gamma_j \Delta u_t(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} T &= AE_j \Delta + z^{-j} G_j \\ E_j B &= F_j T + z^{-j} \Gamma_j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这里, $T, E_j, G_j, F_j, \Gamma_j$ 的形式如下:

$$\begin{aligned} T &= 1 + t_1 z^{-1}, \text{ 设计多项式} \\ E_j &= e_0 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{j-1} z^{-j+1} \\ G_j &= g_{j0} + g_{j1} z^{-1} + \dots + g_{j, n_a} z^{-n_a} \\ F_j &= f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{j-1} z^{-j+1} \\ \Gamma_j &= \gamma_{j0} + \gamma_{j1} z^{-1} + \dots + \gamma_{j, n_y} z^{-n_y} \\ n_y &= \max(n_b, 1) \end{aligned}$$

式中 $n_y = \max(n_b, 1)$, n_a, n_b 表示 A, B 的阶次, 本系统中 $n_a = 2, n_b = 1$; $y_t = y/T$, $\Delta u_t = \Delta u/T$ 。

由式(8)可得 $Y = F\mathbf{u} + Y_1$
式中

$$\begin{aligned} Y &= [\hat{y}(k+1), \dots, \hat{y}(k+N)]^T \\ Y_1 &= [y_1(k+1), \dots, y_1(k+N)]^T \\ \mathbf{u} &= [\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+N-1)]^T \\ F &= \begin{bmatrix} f_0 & & & \\ f_1 & f_0 & & \\ \dots & \ddots & & \\ f_{N-1} & \dots & f_{N-Nu} \end{bmatrix}_{N \times Nu} \end{aligned}$$

极小化 J 可导出最优控制律

$$\mathbf{u} = (F^T F + W)^{-1} F^T (Y_r - Y_1) \quad (10)$$

这里 $Y_r = [y_r(k+1), \dots, y_r(k+N)]^T$
即时控制

$$\left. \begin{aligned} \Delta u(k) &= \bar{d}^T (Y_r - Y_1) \\ u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $\bar{d}^T = [d_1, \dots, d_N]$ 为 $(F^T F + W)^{-1} F^T$ 的第一行。在每一步控制中, 由式(9)在线递推 E_j, G_j, F_j, Γ_j , 进而算出 F 和 Y_1 代入式(11)计算控制作用。

针对式(4)描述的被控对象, 辨识模型取为

$$\Delta y_t(k) = (1-A) \Delta y_t(k) + B \Delta u_t(k-1) + \xi(k)$$

或 $\Delta y_t(k) = X^T(k) \theta(k) + \xi(k) \quad (12)$
其中

$$\left\{ \begin{aligned} X(k) &= [-\Delta y_t(k-1), -\Delta y_t(k-2), \\ &\quad \Delta u_t(k-1), \Delta u_t(k-2)]^T \\ \theta(k) &= [a_1, a_2, b_0, b_1]^T \\ \Delta y_t(k) &= \Delta y(k)/T \end{aligned} \right.$$

本文采用在线递推最小二乘 U-D 分解法从式(12)辨识系数 A, B , 可以保证数值稳定性且计算量小。

在挤压速度计算机控制系统中, 控制周期很短, 一般取 $T_c = 0.1$ s, 这就要求参数辨识以及 GPC 的所有计算能在小于 0.1s 的时间里完

成。考虑到 A, B 的阶次 $n_a = 2, n_b = 1$, 可取 GPC 的预测长度 $N = 6$ 、控制长度 $Nu = 3$ 。在参数辨识与 GPC 的所有计算中, 最费时的是求式(11)中的 $\bar{d}^T$, 因其涉及到求矩阵 $(F^T F + W)$ 的逆。为减小计算量, 本文不采用标准的矩阵求逆算法, 针对上述具体情况, 即需求逆的矩阵为 3×3 阶, 且实际上只需求出其逆阵的第一行即可, 为此

$$\begin{aligned} \text{设 } M &= F^T F + W = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\ \bar{m}^T &= [\bar{m}_1 \quad \bar{m}_2 \quad \bar{m}_3] \text{ 为 } M^{-1} \text{ 的第一行, 则} \\ |M| &= m_{11} m_{22} m_{33} + m_{12} m_{23} m_{31} + \\ &\quad m_{13} m_{21} m_{32} - m_{31} m_{22} m_{13} - \\ &\quad m_{32} m_{23} m_{11} - m_{33} m_{21} m_{12} \\ \bar{m}_1 &= \frac{m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32}}{|M|} \\ \bar{m}_2 &= \frac{m_{32} m_{13} - m_{12} m_{33}}{|M|} \\ \bar{m}_3 &= \frac{m_{12} m_{23} - m_{13} m_{22}}{|M|} \end{aligned}$$

因而

$$\bar{d}^T = \bar{m}^T F^T = [\bar{m}_1 \quad \bar{m}_2 \quad \bar{m}_3] F^T$$

由于本系统中 n_a, n_b 较小, 加之采用上述求逆方法, 在选用 286 级以上工控机的条件下, 能保证整个辨识与控制运算在 0.1s 以内完成。

3 参考轨迹计算

操作人员根据工艺要求制定并输入计算机的模拟等温挤压速度规范, 是以速度和行程关系给出的, 一般可用五段折线来近似, 需要将该速度规范转换成以速度-时间关系形式表示的速度给定曲线, 再由此确定参考轨迹。

设模拟等温挤压速度规范如图 2(a) 所示, 由五段折线表示, 各拐点处行程及各折线斜率如下:

- 初速 v_0 , 第一段折线斜率 0;
- 拐点 1 行程 x_1 , 第二段折线斜率 τ_1 ;
- 拐点 2 行程 x_2 , 第三段折线斜率 τ_2 ;

拐点3行程 x_3 , 第四段折线斜率 τ_3 ;

拐点4行程 x_4 , 第五段折线斜率 τ_4 ;

终点行程 x_5 。

由上述参数不难计算出各拐点处速度:

拐点1速度: $v_1 = v_0$

拐点*i*速度: $v_i = v_{i-1} + \tau_{i-1}(x_i - x_{i-1})$,

$i = 2, 3, 4, 5$ (终点) (13)

在图2(a)中 $[0, x_1]$ 段速度:

$$v(t) = v_0 \quad (14)$$

拐点1时刻为

$$t_1 = x_1 / v_0 \quad (15)$$

在 $[x_i, x_{i+1}]$ 段, $i = 1, 2, 3, 4$, 且 v 与 x 的关系为:

$$v - v_i = \tau_i(x - x_i)$$

对上式两边求导

$$\dot{v} = \tau_i \dot{x} = \tau_i v$$

解之得

$$v(t) = v_i e^{\tau_i(t-t_i)}, t \in [t_i, t_{i+1}] \quad (16)$$

在 $t = t_{i+1}$ 处, 由上式解得:

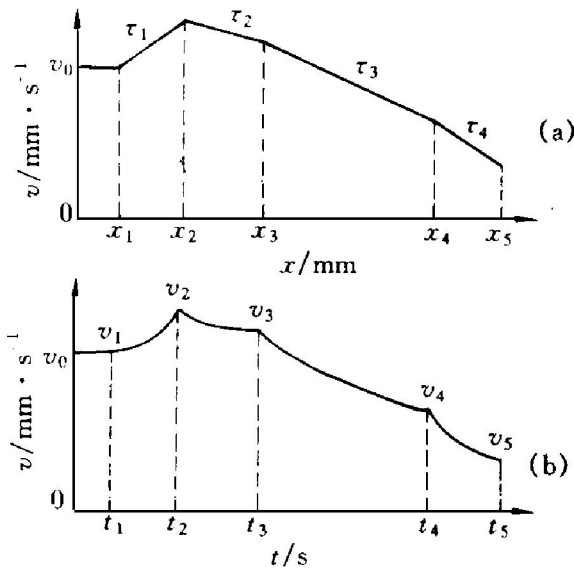


图2 模拟等温挤压速度规范与挤压速度给定曲线

$$v_{i+1} = v_i e^{\tau_i(t_{i+1}-t_i)} \quad (17)$$

$$t_{i+1} = t_i + \frac{1}{\tau_i} \ln \frac{v_{i+1}}{v_i}$$

根据式(13)~(17)可作出用速度-时间关系表示的挤压速度给定曲线, 如图2(b)所示。

取采样周期 $T_c = 0.1s$, 离散化式(14)~(17), 可得出挤压速度给定值计算公式如下

$$v(k) = v_0, k \in [0, k_1] \quad (18)$$

$$v(k) = v_i e^{0.1 \tau_i(k-k_i)}, k \in [k_i, k_{i+1}] \quad (19)$$

$$k_1 = 10 \frac{x_1}{v_0}, k_{i+1} = k_i + \frac{10}{\tau_i} \ln \frac{v_{i+1}}{v_i},$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad (20)$$

由式(18)~(20)及式(7)可计算GPC的参考轨迹序列 $\{y_r(k)\}$, 但由于上式表示的给定曲线是分段的, 因此, 应将计算 $\{y_r(k)\}$ 的式(7)修正为:

- (1) $y_r(k) = y(k), i = 1;$
- (2) if $k + j \leq k_1, j = 1, 2, \dots, N$
 $y_r(k + j) = \alpha y_r(k + j - 1) + (1 - \alpha) v_0;$
- (3) else if $k_i \leq k + j \leq k_{i+1}$
 $y_r(k + j) = \alpha y_r(k + j - 1) + (1 - \alpha) v_i e^{0.1 \tau_i(k + j - k_i)};$
- (4) else $i = i + 1 (i \leq 4),$
return (3)

4 仿真实例

设某厂12500t卧式水压机参数为: $K_m = 10 + 0.05k$, $T_m = 1 + 0.01k(s)$, $T_c = 0.1s$ 。GPC算法其它参数取为: $N = 6$, $Nu = 3$, $n_a = 2$, $n_b = 1$, $t_1 = -0.8$, $\alpha = 0.25$, $\mu = 1.2$, 参数辨识遗忘因子 $\lambda = 0.95$, 白噪声 $\xi(k)$ 的方差 $\sigma^2 = 0.0033$; 在挤压速度给定曲线上, 初速 v_0 为20mm/s, 拐点行程及折线斜率如附表所示。

附表 拐点行程及折线斜率

拐点处行程/mm	斜率/ s^{-1}
$x_1 = 150$	$\tau_1 = 0.0213$
$x_2 = 400$	$\tau_2 = -0.0189$
$x_3 = 550$	$\tau_3 = -0.0278$
$x_4 = 900$	$\tau_4 = -0.0429$
$x_5 = 1000$	

由式(13)、(17)、(20)计算拐点处速度及采样时刻值:

$v_1 = 20\text{mm/s}$, $t_1 = 7.5\text{s}$, $k_1 = 75$;
 $v_2 = 25.325\text{mm/s}$, $t_2 = 18.6\text{s}$, $k_2 = 186$;
 $v_3 = 22.49\text{mm/s}$, $t_3 = 24.9\text{s}$, $k_3 = 249$;
 $v_4 = 12.76\text{mm/s}$, $t_4 = 45.3\text{s}$, $k_4 = 453$;
 $v_5 = 8.47\text{mm/s}$, $t_5 = 54.8\text{s}$, $k_5 = 548$ 。

当 $k = 350$ 时, 在输出信号 $y(k)$ 上加入 $y_d = 1.1$ 的恒值干扰。图3是采用常规PID调节器时的仿真结果, PID参数取为 $K_p = 0.18$, $T_i = 2.5\text{s}$, $T_d = 0.125\text{s}$, 图3表明在挤压机对象参数时变情形下, 采用PID调节器时跟踪特性及抗干扰性能都很差。

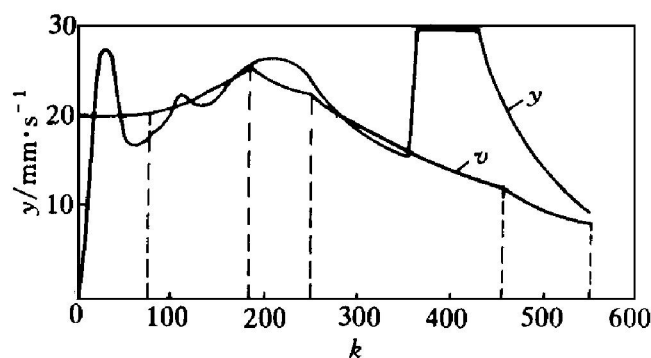


图3 采用常规PID调节器的速度控制性能

采用GPC算法的仿真结果如图4所示, 挤压速度 $y(k)$ 能准确跟踪给定速度曲线, 可见GPC算法对参数时变的挤压机对象适应性强, 抗干扰特性好, 是一种适用于挤压机速度控制的优良算法。

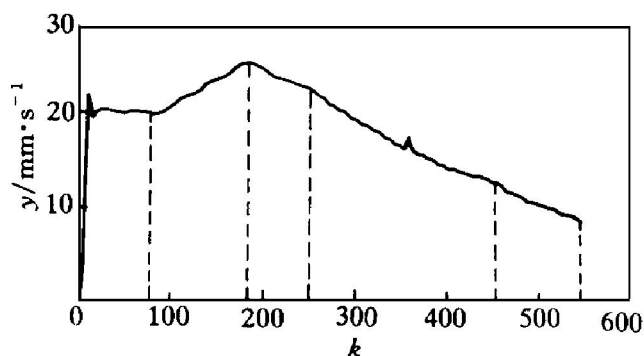


图4 采用GPC算法的速度控制性能

参考文献

- 1 黄 风. 重型机械, 1982, (2): 19—20.
- 2 赵 如. 重型机械, 1982, (12): 68—70.
- 3 陈上达. 重型机械, 1988, (12): 10—16.
- 4 邹 震. 重型机械, 1982, (3): 34—36.
- 5 岳 峰. 重型机械, 1986, (5): 40—43.

PREDICTIVE CONTROL OF EXTRUSION VELOCITY FOR HYDRAULIC EXTRUSION PRESS

Peng Hui

College of Information Engineering, Central South University of Technology, Changsha 410083

Peng Xiaoyan

College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha 410082

Wei Liang, Cao Xianye

Forging Branch Plant, Southwest Aluminium Fabrication Plant, Chongqing 631326

ABSTRACT The relationship between the marching speed of main plunger of extrusion press and the control pulses of stepping motor's driving throttle valve was described by CARIMA model. The generalized predictive control (GPC) strategy was used to control extrusion velocity. This method can make the press track speed guide curves to achieve simulative isothermal extrusion. Simulation results showed that the GPC algorithm enabled extrusion speed to follow the given tracks accurately, and could effectively restrain the influence of variety of plant parameters.

Key words hydraulic extrusion press extrusion speed control CARIMA model GPC algorithm

(编辑 何学锋)