

液压位置伺服系统同步的控制^①

王 宪, 孙开林, 杨 坤

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

摘 要: 针对无缝钢管生产线轧机两侧液压位置伺服系统内部参数不同和外界干扰不一致造成轧辊压下位置不同步的问题, 设计了基于模糊输出反馈的液压位置伺服同步控制系统, 并从理论上证明了该控制系统的稳定性。仿真结果表明, 在轧机两侧内部参数不同和外部干扰差异的情况下, 基于模糊输出反馈的液压位置伺服同步控制系统不仅具有较短的同步时间并且跟随误差更小。

关键词: 液压; 模糊; 动态输出反馈; 同步

Synchronous Control of Hydraulic Position Servo System

WANG Xian, SUN Kai-Lin, YANG Kun

(Institute of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: According to the problem of seamless steel pipe rolling mill production line, both sides of the hydraulic position servo system the inside different parameters and external interference caused by roller depressed position inconsistent synchronization, we designed the hydraulic position servo control system based on fuzzy output feedback synchronization, and prove the stability of the control system in theory. Simulation results show that hydraulic position servo control system based on fuzzy output feedback synchronization not only has short synchronization time but also has smaller error, when in the case of the differences both sides of the rolling mill inside the parameters and external disturbances.

Key words: hydraulic; fuzzy; dynamic output feedback; synchronous

现代工业的快速发展对同步精度提出了越来越高的要求^[1-3]。某无缝钢管生产线采用液压位置伺服系统对轧机两侧轧辊进行定位控制。漏油、油污和外界环境变化等因素的影响造成了轧机两侧液压位置伺服系统内部参数不同, 轧机运行过程中两侧受到的干扰也存在差异, 内部参数的不同和外界干扰的差异造成轧机两侧液压位置伺服系统压下位置不同步。近年来, 众多学者对液压位置伺服系统同步控制进行的大量的研究, 张志伟^[4]等采用两侧轧辊实际输出位置的平均偏差作为反馈信号, 利用传统的 PID 算法计算出两侧位置的修正值去控制轧辊的位置。这种控制方法算法结构简单, 能够在一定程度上减小两侧同步误差, 是一种比较适用工程应用的经验试凑方法, 但在内部参数

不同和外界干扰的情况稳定性缺乏理论证明。李娇, 任翔^[5-7]等将鲁棒动态输出反馈控制理论应用到轧机两侧液压位置伺服同步控制系统的设计上来, 从理论上证明了系统的稳定性, 但在轧机一侧受到干扰的情况下难以取得良好的跟随效果。

针对轧机两侧液压位置伺服系统内部参数不同和外部扰动差异, 首先将动态输出反馈应用到液压位置伺服系统同步控制上来, 从理论上证明了该系统的稳定性。在保证系统稳定性的前提下利用模糊控制^[8,9]柔化控制信号的功能, 对反馈信号模糊化处理, 设计了基于模糊动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统。仿真结果表明, 设计的同步系统在轧机两侧液压位置伺服系统内部参数不同和外界干扰差异的情况下依

① 基金项目: 国家自然科学基金(60574051)

收稿时间: 2010-11-08; 收到修改稿时间: 2010-12-18

然保持了非常好的同步效果。

1 液压位置伺服系统模型

无缝钢管生产线轧机两侧轧辊液压位置伺服系统由控制器、伺服放大器、伺服阀、液压缸、负载（轧辊）以及位置传感器等组成，结构示意图如图1所示。

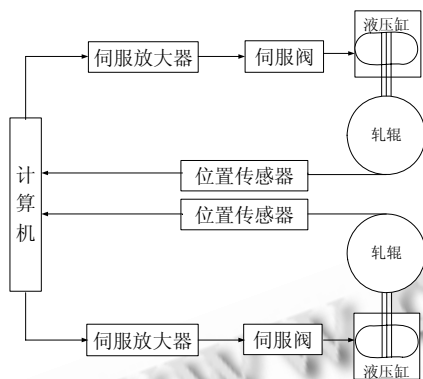


图1 系液压伺服系统结构示意图

在不考虑液压缸结构柔度的影响、忽略摩擦负载和弹性负载前提下，将液压位置伺服系统整定为二阶系统，其传递函数：

$$G_i(s) = \frac{K_v \omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} \quad i=1,2 \quad (1)$$

其中， K_v 为放大系数， ξ_i 为动力原件阻尼比， ω_{ni} 为液压缸固有频率。参数 ξ_i 、 ω_{ni} 存在不确定性，同时系统还受到一定的外界干扰。

2 动态输出反馈控制器设计

2.1 动态输出控制器设计

对于两侧子系统，分别取状态：

$$\bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \end{bmatrix} \quad i=1, 2 \quad (2)$$

其中， x_{pi} 是子系统 i 的轧辊位移，则：

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = -\omega_{ni}^2 x_{i1} - 2\xi_i \omega_{ni} x_{i2} + \omega_{ni} u_i \end{cases} \quad (3)$$

定义跟踪误差：

$$e = x_{p1} - x_{p2} \quad (4)$$

则对误差求导数：

$$\dot{e} = x_{12} - x_{22} \quad (5)$$

令： $\bar{x} = [x_{11} \ x_{12} \ x_{21} \ x_{22}]^T$, $\bar{u} = [u_1 \ u_2]^T$ ，则两侧液压位置伺服系统同步跟踪模型的状态空间形式为：

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{u} + \Delta A\bar{x} + \Delta B\bar{u} + F \\ y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

其中：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_{n1}^2 & -2\xi_1\omega_{n1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_{n2}^2 & -2\xi_2\omega_{n2} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{n1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{n2}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$\Delta A, \Delta B$ 是相应维数的不确定系数矩阵； F 是系统中存在的有界外部扰动。

$$\bar{u} = [u_1 \ u_2]^T = \bar{x}_{pg} + \bar{T}u_c \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_c = A_c \bar{x}_c + B_c \bar{e} \\ u_c = \bar{K}_c \bar{x}_c + \bar{D}_c e \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} r \\ r \end{bmatrix} \quad \bar{T} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

r 为两侧液压位置伺服系统的位置给定， x_c 为同步控制器状态， u_c 为同步控制器输出。

设 $\tilde{x} = [\bar{x}^T \ \bar{x}_c^T]^T$ 为增广的系统状态，

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A + B\bar{T}\bar{D}_c\bar{C} & B\bar{T}\bar{K}_c \\ B_c\bar{C} & A_c \end{bmatrix} \quad \tilde{r}_{pg} = \begin{bmatrix} B\bar{r}_{pg} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\tilde{A} = \begin{bmatrix} \Delta A + \Delta B\bar{T}\bar{D}_c\bar{C} & \Delta B\bar{T}\bar{K}_c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{F} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}$$

将式(7)、式(8) 代入式(6),得闭环系统方程为：

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \Delta\tilde{A}\tilde{x} + \tilde{F} + \tilde{r}_{pg} \quad (9)$$

2.2 稳定性证明

Lyapunov 稳定性分析是解决非线性系统稳定性问题的一般方法, Lyapunov 定义了一个虚构的能量函数, 称为 Lyapunov 方程, 根据 Lyapunov 稳定性定理, 对于非线性系统, 通过构造某个具体的 Lyapunov 函数满足正定有界, 若存在具有连续一阶偏导数的纯量函数并满足负半定条件, 可以证明系统在某个稳定域内是渐近稳定的。

假设系统的不确定性满足如下的范数有界条件:
 $\|\Delta A\| \leq \rho_A \quad \|\Delta B\| \leq \rho_B \quad \|\tilde{\omega}\| \leq \rho_F \|\tilde{x}\|$ (10)

若存在正定对称矩阵 P 和 Q, 使得 Lyapunov 方程

$$\tilde{A}P + P\tilde{A} + Q \leq 0 \quad (11)$$

成立。对控制器参数 Ac, Bc, Kc, Dc, 闭环系统(9)是渐近稳定的充分条件是系统不确定性满足条件。

$$\beta_A + \rho_w \leq \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\lambda_{\max}(P)} \quad (12)$$

其中, $\beta_A = \rho_A + \sqrt{2}(\|D_c\| + \|K_c\|)$

根据 Lyapunov 定理构造满足正定条件的 Lyapunov 函数:

$$V(\tilde{x}) = \tilde{x}^T P \tilde{x} > 0 \quad (13)$$

求导, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\tilde{x}}^T P \tilde{x} + \tilde{x}^T P \dot{\tilde{x}} \\ &= \tilde{x}^T (\tilde{A}^T P + P \tilde{A}) \tilde{x} + 2\tilde{x}^T \Delta A \tilde{P} \\ &\quad + 2\tilde{\omega}^T P \tilde{x} \end{aligned} \quad (14)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知, 若能量函数导数 <0, 则系统一致渐近稳定, 若式 (12) 成立, 则有:
 因为:

$$\begin{aligned} \|\Delta \tilde{A}\| &\leq \|\Delta A + \Delta B \tilde{T} D_c C\| + \|\Delta B \tilde{T} K_c\| \\ &\leq \|\Delta A\| + \sqrt{2} \|\Delta B\| \|\Delta D_c\| + \sqrt{2} \|\Delta B\| \|\Delta K_c\| \\ &\leq \rho_A + \sqrt{2} (\|D_c\| + \|K_c\|) = \beta_A \\ \tilde{x} \Delta \tilde{A}^T P \tilde{x} &\leq \|\Delta A\| \cdot \|P\| \cdot \|\tilde{x}\|^2 \leq \beta_A \|P\| \cdot \|\tilde{x}\|^2 \\ \tilde{\omega}^T P \tilde{x} &\leq \rho_w \|P\| \cdot \|\tilde{x}\|^2 \\ \dot{V} &\leq \tilde{x}^T (-Q + 2(\rho_A + \rho_w) \|P\| \tilde{I}) \tilde{x} \\ &\leq \tilde{x}^T (-Q + 2 \frac{\lambda_{\min}(\tilde{Q})}{2\lambda_{\max}(P)} \cdot \lambda_{\max}(P) \tilde{I}) \tilde{x} \\ &\leq \tilde{x}^T (-Q + \lambda_{\min}(Q) \tilde{I}) \tilde{x} \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

当且仅当 $\tilde{x} = 0$ 时, $V = 0$ 。因此, 根据 Lyapunov 稳定性定理, 闭环系统(9) 的状态是渐近稳定的, 跟踪误差 e 最终将趋近于零, 即在存在参数不确定性和外负载扰动的情况下可以实现同步控制。

3 模糊控制器设计

基于输出动态反馈的液压位置伺服同步系统在理论上是渐渐稳定的, 然而, 在当轧机一侧受到外界干扰时, 由于动态输出反馈器的控制信号的突变, 另一侧的液压位置伺服系统难以在较短的时间内实现有效的跟随, 在保证系统稳定性的利用模糊控制系统前提下对动态反馈控制信号进行柔化处理。

1) 定义模糊集

PB=正大; PM=正中; PS=正小; ZO=零; NS=负小; NM=负中; NB=负大

2) 根据模糊控制原理, 定义 u_c 为模糊控制器的输入, $u_c = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 论域为 $\{-2, +2\}$; 输出为 $u_{cx} = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 其论域为 $\{-6, +6\}$

上述模糊化变量均选择正态分布隶属函数。

3) 模糊规则

模糊控制器的作用是柔化动态输出反馈器的控制信号, 得以下七条模糊规则模糊规则:

- IF u_c IS NB THEN u_{cx} IS NB
- IF u_c IS NM THEN u_{cx} IS NM
- IF u_c IS NS THEN u_{cx} IS NS
- IF u_c IS ZO THEN u_{cx} IS ZO
- IF u_c IS PS THEN u_{cx} IS PS
- IF u_c IS PM THEN u_{cx} IS PM
- IF u_c IS PB THEN u_{cx} IS PB

将设计的动态输出反馈控制器与模糊控制器相结合, 基于模糊动态输出反馈液压位置伺服同步控制系统框图如图 2 所示:

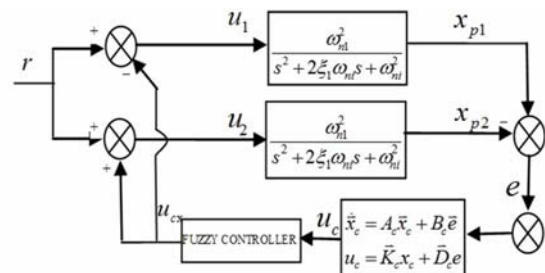


图 2 模糊动态输出反馈液压位置伺服同步控制系统

4 仿真

为验证基于模糊动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统的可行性,利用 MATLAB 对系统进行仿真。轧机两侧液压位置伺服系统取不同的参数 $\omega_{ni}=32$, $\xi_i=0.75$, $\omega_{ni}=24$, $\xi_i=0.6$, 对动态反馈控制器去一组参数:

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -25 & -30 \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \end{bmatrix}, K_c = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}, D_c = 5$$

在其中一侧的液压位置伺服系统加入外界有界扰动,在阶跃位置给定的情况下与一般基于动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统相比较,结果如图 3,图 4。

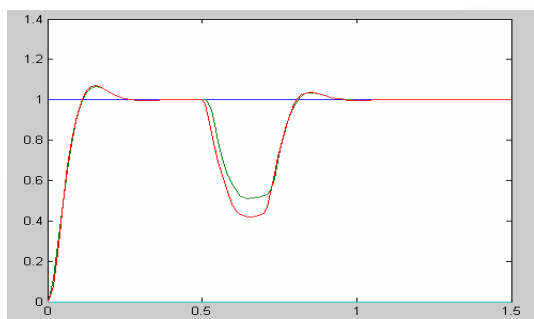


图 3 动态输出反馈的同步控制系统仿真

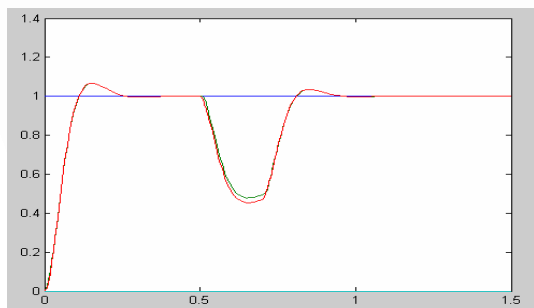


图 4 模糊动态输出反馈的同步控制系统仿真

由仿真结果可知,在基于模糊动态输出反馈的液压位置伺服同步系统与基于动态输出反馈的液压位置伺服系统具有相同的反应时间。在外界干扰的情况下,动态输出反馈的最大误差达到了 14%,在工厂的实际生产中,由于电机误差过大,使得钢板的平滑程度不能得到保证,对随后进行的一系列焊接过程也带来了巨大的误差,造生额外的电力物力浪费,并且产品的质量难以得到保证,阻碍了生产工艺的进一步提高。而在采用模糊动态输出反馈的同步控制后,对非线性系统中一系列不确定性因素造成的影响能进行较大的

弱化改善,其最大超调只有 3%,有助于节约社会资源,提高了产品质量。

5 结语

针对轧机两侧液压位置伺服系统内部参数不一致造成压下位置不同步的问题,首先引入动态输出反馈控制器,设计了基于动态输出的液压位置伺服同步控制系统,并从理论上证明了该系统的稳定性。为解决在外界干扰引起的两侧位置不同步问题,在保证系统稳定性的前提下利用模糊控制对动态输出反馈控制器控制信号进行模糊化处理,设计了基于模糊动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统。仿真结果表明,基于模糊动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统保持了基于动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统的控制精度,而在外界干扰的情况下,基于模糊动态输出反馈的液压位置伺服同步控制系统具有更小的跟随误差。

参考文献

- 1 张志伟,张福波,王国栋.一种双液压缸同步控制方法及其仿真研究.机床与液压,2003,(3):232-39.
- 2 Jang JS, Kim YB, Lee IY, Yun SN. Design of a synchronous position controller with a pneumatic cylinder driving system: Proceedings of Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference. Sapporo, Japan: Monograph, 2004.295-299.
- 3 Ren L, Mills JK, Sun D. Adaptive synchronization control of a planar parallel manipulator. Proc. of the 2004 American Control Conference. Boston, Massachusetts, USA: IEEE, 2004.3980-3985
- 4 张志伟,张福波,王国栋.一种双液压缸同步控制方法及其仿真研究.机床与液压,2003,(3):232-39.
- 5 李娇,刘玉忠,史书慧,孙常春.一类切换系统的动态输出反馈控制器设计.电机与控制学报,2006,10(6):627-631.
- 6 任翔.基于自抗扰和反馈控制的电液位置同步系统.制造业自动化,2010,32(1):84-87.
- 7 Yan JJ, Lin JS, Liao TL. Robust dynamic compensator for a class of time delay systems containing saturating control input. Chaos, Solitons and Fractals, 2007,31(5):1223-231.
- 8 杨坤,王宪.基于模糊滑膜算法的液压位置伺服系统.计算机系统应用,2010,19(8):108-111.
- 9 王益群,宁淑荣,刘建.热轧辊电液伺服系统的自适应模糊控制.机械工程学报,2007,43(12):1-4.