

四辊液压轧机 AGC 动态分析和设计*

张宗欣^① 林 波^②

(华侨大学电子工程系, 泉州 362011; ②深圳市先科机械电子公司, 深圳 518002)

摘要 对四辊液压轧机自控制系统进行动态分析, 并对数字控制器的数学模型进行设计. 这在实际应用中, 有助于指导液压轧机的改进.

关键词 自动控制, 动态分析, 液压轧机, 厚度

分类号 TP 273

由于液压压下快速性等一系列优点, 板材轧机目前均采用液压压下技术, 对传统的电动压下轧机也逐步实行改造. 伴随着液压压下技术的应用, 厚度自动控制(AGC)技术得以迅速发展. 同时, 微型计算机的应用, 使目前板材轧机的产品精度提高了一个数量级, 对0.3mm的带材厚度, 通带误差应不大于3 μm .

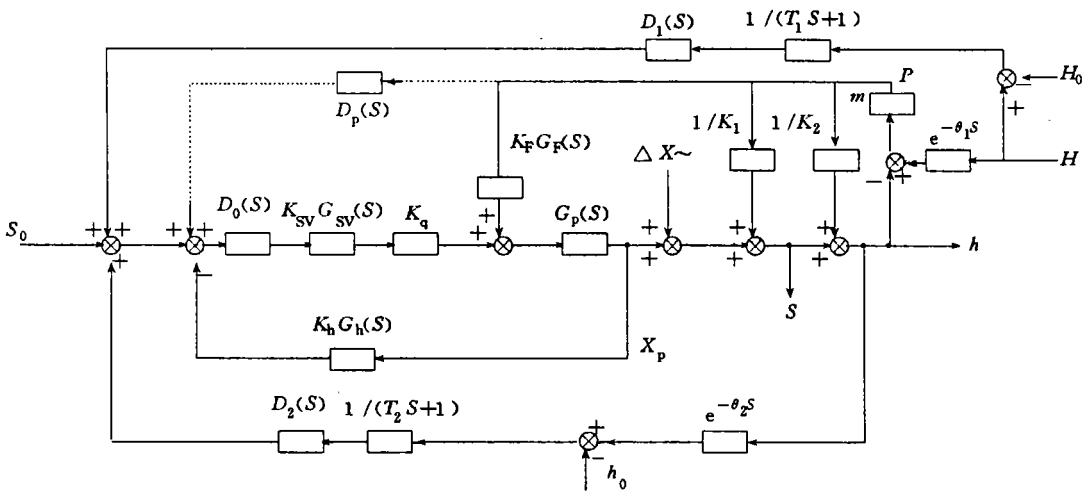
1 系统动态框图

影响轧机出口厚度精度的主要因素有两方面: (1) 周期性的干扰因素, 包括入口厚度的波动, 以及支承辊偏摆造成的辊缝波动; (2) 漂移性的干扰因素, 包括轧辊热变形、液压及电气系统的漂移、张力、速度的变化等. 为了保证出口厚度不受或少受各种干扰因素的影响, 在厚度自动控制系统中, 除了要有保持辊缝大小的位置闭环系统外, 还必须具有消除入口厚度干扰的预控系统、轧辊偏摆干扰的偏心补偿系统、各种漂移与其它干扰造成出口厚度偏离的监控系统. 为了正确设计各系统的微机数字控制器, 必须对液压轧机进行动态分析, 在此基础上推导出各数字控制器的数学模型.

液压轧机一般采用四辊形式, 其系统框图如附图所示^[1]. 在图中位置闭环由 X_F 引出反馈, 对应于将位移传感器安装在油缸活塞上. 若从 S 引出反馈, 则对应于位移传感器安装在工作辊轴承座之间. 其中 $D_0(S)$, $D_F(S)$, $D_1(S)$, $D_2(S)$ 分别为位置闭环、轧制力反馈、预控和监控的调节器; $K_{SV}G_{SV}(S)$ 为电液伺服阀的传递函数, 二阶环节; K_q 为流量放大系数, 比例环节; $K_h G_h(S)$ 为位移传感器传递函数, 惯性环节; K_1^{-1} 为轧机机架、支承辊及工作辊外侧的变形系数, 比例环节; K_2^{-1} 为工作辊内侧的变形系数, 比例环节; m 为轧机的塑性系数, 比例环节; $(T_1 S + 1)^{-1}$ 为入口侧测厚仪的传递函数; $(T_2 S + 1)^{-1}$ 为出口侧测厚仪的传递函数; $K_F G_F(S)$ 为油缸压缩和泄漏的传递函数, 比例微分环节; S_0 为辊缝设定值; h 为出口厚度; H 为入口厚度;

* 本文 1996-03-27 收到

H_0 为入口侧测厚仪上的厚度设定值; h_0 为出口侧测厚仪上的设定值; ΔX 为偏心干扰量; $e^{-\theta_1 \cdot s}$ 为入口侧从测厚仪到压下中心线的传递函数, 纯延迟环节; $\theta_1 = L/V_1$, 其中 L 为测厚仪到轧制中心线之间的距离, V_1 为入口侧的带材速度; $e^{-\theta_2 \cdot s}$ 为出口侧从压下中心线到测厚仪之



附图 四辊液压轧机AGC系统图

间的传递函数, 纯延迟环节; $\theta_2 = L/V_2$, L 同上, V_2 为出口侧带材速度. $D_0(S)$ 一般采用比例环节, 用以提高位置闭环系统的快速性和稳定性. 本文以其余的 $D_1(S)$, $D_2(S)$ 和 $D_p(S)$ 作为分析和设计的对象, 并对偏心干扰 ΔX 的影响进行分析.

2 $D_p(S)$ 的分析和设计

$D_p(S)$ 为轧制力闭环调节器. 附图中 $D_1(S)$ 和 $D_2(S)$ 未投入, 则在位移反馈信号从 X_p 引出时, 为了分析偏心 ΔX 和入口厚度 ΔH 对出口厚度的干扰, 将 $K_F G_F(S)$ 引入的相加信号按移动规则移动到反馈引入的相加点之前, 则无干扰的位置闭环传递函数为: $\varphi(S) = D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q \cdot G_p(S) / (1 + D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q \cdot G_p(S) \cdot K_h \cdot G_h(S))$. 若令 $K_1^{-1} + K_2^{-1} = K^{-1}$, 则 $D_p(S)$ 投入后偏心 $\Delta X(S)$ 对出口厚度 $\Delta h(S)$ 的干扰关系为

$$\left. \frac{\Delta h(S)}{\Delta X(S)} \right|_{\Delta H(S)=0} = \{ (1+m) [K^{-1} + ((K_F G_F(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q + D_p(S)) \varphi(S))] \}^{-1}.$$

当 $K^{-1} + K_F G_F(S) \varphi(S) / D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q + D_p(S) \varphi(S) = 0$ 时, $\Delta h(S) = \Delta X(S)$. 也就是偏心量以 1:1 影响出口厚度, 此时的 $D_p(S) = -((K \cdot \varphi(S))^{-1} + K_F G_F(S) / D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q)$. 实际上为压力正反馈, 轧机为硬特性轧制. 因为一般 $D_0(S) = K_0$, 而 $K_h \cdot G_h(S)$ 中 K_h 取 1, 所以稳态时 $\varphi(S) = 1$. 因此在稳态时当 $K_p = -(K^{-1} + K_F / K_0 \cdot K_{sv} \cdot K_q)$ 时, 轧机的刚度为无穷大, 这称为恒辊缝轧机, 其偏心对出口影响最大.

当 $K^{-1} + [(K_F G_F(S) / D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q) + D_p(S)] \varphi(S) = \infty$ 时, 偏心量对出口厚度影响为零, 即 $D_p(S) = K_p \cdot G_p(S) = \infty$, 稳态时 $K_p = \infty$. 实质上这为压力强负反馈, 其轧机刚度最软, 属于恒轧制力轧制. 而入口厚度干扰 $\Delta H(S)$ 对出口厚度的影响可表示为

$$\left. \frac{\Delta h(S)}{\Delta H(S)} \right|_{\Delta x(S)=0} = \frac{m[K^{-1} + (K_F G_F(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q + D_p(S))\varphi(S)] \cdot e^{-\theta_1 s}}{1 + m[K^{-1} + (K_F G_F(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q + D_p(S))\varphi(S)]}.$$

当 $K^{-1} + [K_F G_F(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q + D_p(S)]\varphi(S) = 0$, 稳态时, $K_p = -(K^{-1} + K_F/K_0 \cdot K_{sv} \cdot K_q)$, 则入口厚度对出口厚度影响为零. 这就是说它具有极强的消差能力. 而当 $K^{-1} + [K_F G_F(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q + D_p(S)]\varphi(S) = \infty$, 稳态时, $K_p = \infty$, $\Delta h(S) = \Delta H(S) \cdot e^{-\theta_1 s}$, 入口厚度 1:1 影响出口厚度而无消差能力.

综上所述可知, 利用轧制力构成正反馈时的轧机为恒辊缝轧制, 它对入口厚度消差能力最强, 但偏心却为 1:1 的干扰出口厚度. 而当利用轧制力构成强负反馈时则为恒轧制力轧制, 它对入口厚度消差能力变弱, 但偏心对出口厚度的影响却大大减少. 显然, 上述两者是相互矛盾的, 这就是 70 年代至 80 年代初, 液压轧机 AGC 研制者曾企图通过轧制力正反馈, 以提高轧机刚度来提高轧机出口精度的努力不能达到预期效果的根本原因. 特别当支承辊加工精度、轴承精度较低, 而采用硬特性轧制时, 使得出口厚度精度可能比自然特性轧制更低.

3 $D_1(S)$ 的分析和设计

由于上述原因, 人们开始研究新的途径. 其中一种办法是位移检测元件安装在工作辊轴承座之间, 即附图中从 S 引出反馈 ($D_p(S)$ 暂不投入和 $D_2(S)$ 未投入). 此方案可以将偏心干扰以及轧制力 P , 通过 K_1^{-1} 引入的干扰包含在位置闭环之内. 只要位置闭环响应频率较高, 这些干扰是可以自动消除的, 而 K_2^{-1} 的干扰只是工作辊内侧的变形量, 一般较小. 显然, 这是一种较好的方案. 近年来, 根据此方案生产的轧机已有一定的数量, 用户反映良好. 但是, 此方案在工作辊轴承座之间安装了位移传感器, 要求须有专用的装置且换辊比较不方便, 又容易损伤轧辊, 因此目前在大型轧机上应用较少. 另一种方案是在位置闭环的基础上, 通过入口侧和出口侧的测厚仪构成预控系统 ($D_1(S)$) 和监控系统 ($D_2(S)$), 并利用轧机软特性轧制或专用的偏心补偿装置, 分别消除入口厚度干扰和偏心干扰, 以提高出口厚度精度.

$D_1(S)$ 为预控调节器, 它利用入口侧测厚仪信号对辊缝适时修正, 达到消除入口厚度波动对出口厚度的干扰. 在 $D_p(S)$ 暂不投入时, 由附图可列出入口厚度对出口厚度的关系式为

$$\Delta h(S) = \frac{m(K^{-1} + K_F G_F(S) \cdot \varphi(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q) \cdot e^{-\theta_1 s} \cdot \Delta H(S)}{[1 + m(K^{-1} + K_F G_F(S) \cdot \varphi(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q)]},$$

而 $\Delta H(S)$ 通过 $D_1(S)$ 对出口厚度产生的修正量为

$$\Delta h'(S) = \Delta H(S) \cdot D_1(S) \cdot (T_1 S + 1)^{-1}$$

$$\times \left[\frac{K \varphi(S) \cdot (m + k)^{-1}}{1 + K \cdot \varphi(S) \cdot (m + k)^{-1} \cdot m \cdot K_F G_F(S) \cdot (D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q)} \right].$$

实现全补偿的条件为 $\Delta h(S) + \Delta h'(S) = 0$. 在实际应用中可取 $K_F G_F(S)/D_0(S) \cdot K_{sv} G_{sv}(S) \cdot K_q = 0$, 则 $D_1(S) = \frac{m}{K} \cdot e^{-\theta_1 s} / (1 + \frac{m}{K}) \cdot \frac{1}{T_1 S + 1} \cdot \frac{K}{m + K} \cdot \varphi(S) = -\frac{m}{K} \cdot e^{-\theta_1 s} (T_1 S + 1) / \varphi(S)$. 而 $\varphi(S)$ 可用一阶环节或二阶环节表示, 为了简化一般取一阶环, 即 $\varphi(S) = (\tau S + 1)^{-1}$. 因此 $D_1(S) = -\frac{m}{K} \cdot e^{-\theta_1 s} (T_1 S + 1) (\tau S + 1) = -v \cdot e^{-(\theta_1 - T_1 - \tau) \cdot s}$, 其中 $v = m/K$ 为预控压速率, $D_1(S)$ 为可变延时环节, 它可通过微机实现之.

4 $D_2(S)$ 的分析和设计

轧机的出口厚度不仅受入口厚度、轧辊偏摆等波动因素的干扰,而且受轧辊热变形、液压系统及电气系统漂移、轧制张力、轧制速度等因素的干扰。出口厚度和辊缝设定值之间没有一个准确的关系式可以应用,因而出口厚度无法准确锁定在所要求的目标尺寸上。监控系统是利用出口侧的测厚仪,以检测出口侧的实际厚度与所要求的目标厚度之间的偏差。当偏差值超过设定公差范围时,应对辊缝设定值进行修正,以保证出口厚度锁定在要求的偏差范围内。

由附图可见,由于漂移等原因,若出口厚度误差为 $\Delta h(S)$,则通过 $D_2(S)$ 系统对出口厚度的修正量为 $(D_p(S)$ 暂不投入)。

$$\Delta h'(S) = \frac{[\Delta h(S) \cdot e^{-\theta_2 S} \cdot (T_2 S + 1)^{-1} \cdot D_2(S) \cdot \varphi(S) \cdot K / (K + m)]}{[1 + \varphi(S) \cdot (K / (K + m)) \cdot m \cdot K_F G_F(S) / D_0(S) \cdot K_{SV} G_{SV}(S) \cdot K_q]}$$

当 $\Delta h'(S) + \Delta h(S) = 0$ 时为最佳修正。考虑取 $m \cdot K_F G_F(S) / D_0(S) \cdot K_{SV} G_{SV}(S) \cdot K_q = 0$, 则

$$D_2(S) = - (K + m) / K \cdot (T_2 S + 1) \cdot (\tau S + 1) \cdot e^{\theta_2 S} = - \xi \cdot e^{(\theta_2 + T_2 + \tau) \cdot S},$$

其中 $\xi = (K + m) / K$ 为监控压下率, $D_2(S)$ 可通过微机实现。

5 偏心补偿及其它

为了消除轧辊偏摆的干扰,除将位移传感器安装在工作辊中心线的方案以外,还可利用 $D_p(S)$ 实现强负反馈,使轧机工作在软特性状态下以减少偏心干扰。然后,采用预控方案提高对入口波动的消差能力。另外一种方案是利用偏心微机补偿方案,如文[2]所述。对于入口带材的硬度波动,只有采用硬特性轧制的方法解决。轧机必须设有监控系统,才能使产品满足要求的公差范围。在监控中,公差范围的设定不宜过小,否则会引起过于频繁的调正而造成表面质量较差,甚至误差反而过大。

参 考 文 献

- 1 张宗欣. 液压轧机厚度自动控制及微机应用. 厦门:厦门大学出版社,1991. 63~69
- 2 张宗欣. 液压轧机轧辊偏心微机补偿系统. 电子与自动化,1990,(6):23~28

Dynamic Analysis and Design of Automatic Thickness Control System for a Hydraulic Rolling Mill with 4 Rolls

Zhang Zongxin^① Lin Bo^②

(^①Dept. of Electron. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou;

^②Shenzhen Xianke Mech. & Electron. Co., 518002, Shenzhen)

Abstract A dynamic analysis is made on the automatic thickness control system for a hydraulic rolling mill with 4 rolls. A design is made on the mathematical model of a digital controller. These are of practical significance for theoretical study and actual application of hydraulic rolling mill.

Keywords hydraulic rolling mill, thickness, automatic control