

热连轧机自适应前馈厚度调节系统的仿真研究

陈振宇 张显东

(冶金部自动化所)

摘 要

本文用数字仿真的方法,对热连轧机厚度调节系统克服水印温差干扰的方法进行了分析和研究。文中提出通过实测连轧机前架轧制力作为前馈补偿量来预报后架轧制力,并通过对后架轧制力进行自适应跟踪修正前馈补偿量的方法,可以有效地克服水印温差干扰。文中并提出根据残差平方和最小的原则,优选滤波增益因子,可以改进下一块钢的自适应效果。仿真计算的结果表明,应用本文方法效果显著。文中提出的方法,可供改造旧系统或设计类似新系统时参考。

一、前 言

热连轧机轧出的带钢造成厚度偏差的原因很多,最主要的原因是来料厚度及温度的变化。来料厚度变化较为缓慢,经过几架轧机反馈厚度调节系统的校正,一般可以取得较好效果。而对于水印温差干扰(由于钢坯放在加热炉内导轨上局部形成低温段的周期性变化),温度变化频率通常较高(取决于炉内导轨间距和轧制速度),且每架都存在温差干扰再现性,一般采用存在一定时间滞后的反馈调节系统时调节效果较差。

某厂1700热连轧机,采用取前架出口厚差作为前馈量的前馈控制方案^[2]。其前馈补偿信号只是间接检测前架来料厚度波动,因此只能对前架来料厚度波动起补偿调节作用。而对于克服水印温差引起的每架都存在的来料硬度周期性变化的干扰效果很差^[1]。

日本美坂佳助等提出了取前架轧制力作为前馈控制量的方法^[3],提出为了取得前一架的准确轧制力求取前馈补偿量,不得不切除前架的反馈AGC控制。此法无法保留各架都设反馈AGC以充分克服厚差的优点。并且亦无法多架都设前馈控制。

本文提出的方法是以轧制力作为前馈信号,它既包含厚度偏差的信息也包含水印温差造成的硬度偏差的信息。在系统中多架都可设前馈控制,同时又保留每架都可设反馈AGC控制的优点。为提高控制精度,对下一架预报轧制力用卡尔曼滤波的基本原理,进行自适应校正,并通过实测本块钢的轧制参数,优选最佳的自适应增益因子,以进一步改进下块钢的自适应效果。本方案所涉及的算法简单,易于实现在线控制。

二、热连轧机厚度调节系统的仿真模型

热连轧机两个机架的仿真模型如图 1 所示。

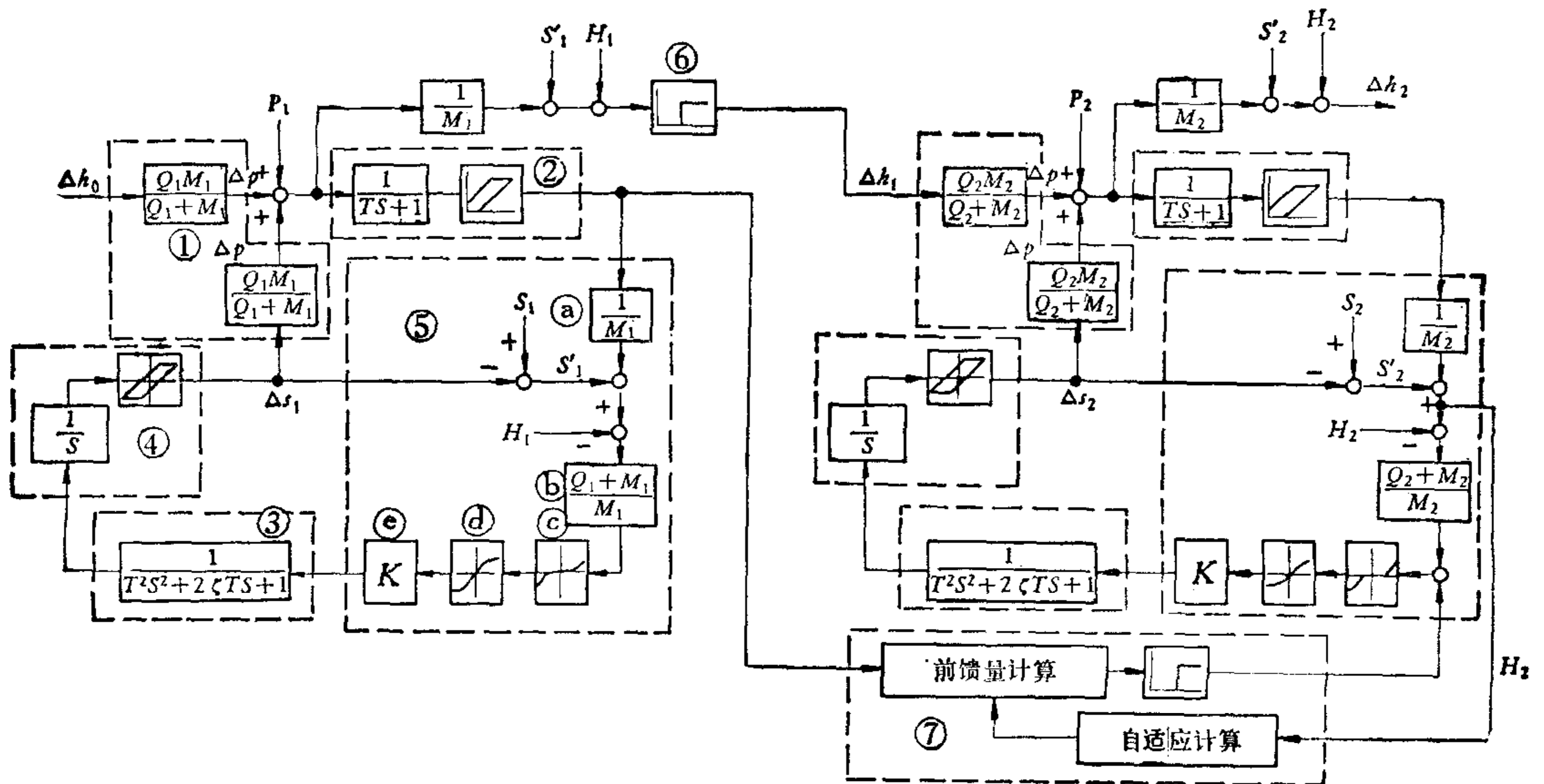


图 1 热连轧两机架 AGC 系统的仿真模型

框①模拟轧机辊缝的轧制关系

$$\Delta p = \frac{Q \times M}{Q + M} \times \Delta h \quad (2.1)$$

同时

$$\Delta p = \frac{Q \times M}{Q + M} \times \Delta s \quad (2.2)$$

其中 M 为机架刚度; Q 为材料塑性系数。

框②模拟测压头,其动特性用一个一阶惯性环节 $\frac{1}{TS+1}$ 串联一个体现压头磁滞特性的非线性环节来仿真(采用 400Hz 供电,时间常数 $T=0.003s$,压头磁滞约 1%,取 $\pm 10t$)。

框③模拟压下电机。其特性可用二阶微分方程描述,写成传递函数的形式为

$$\frac{1}{T^2S^2 + 2\zeta TS + 1} \quad (\text{电机时间常数 } T=0.08 \text{ 秒, 阻尼系数 } \zeta=0.8)$$

框④模拟压下螺丝。其输出(辊缝的变化)为输入(马达转速)的积分。因此,用一个积分环节 $\frac{1}{S}$ 串联一个表征机械间隙特性的非线性环节来仿真。

框⑤模拟 DDC 计算机。它所执行的每一种算法,均用一个相应环节来描述。如轧制力经框②换算成机架弹跳;厚度偏差经框⑥换算成辊缝调节量;框③是为避免轧辊偏心导致频繁调节而设置的死区控制;框④是加速电机响应特性的算法 ($V \propto \sqrt{\Delta s}$);框⑤为比

例因子 ($K = 0.1$).

框⑥模拟机架间带钢运行,可以用一个纯滞后环节来仿真.

第二架轧机的仿真情况与第一架完全类似.

框⑦模拟本文提出的轧制力前馈控制及自适应算法(可由 DDC 计算机兼作).

利用已建立的仿真模型,按照信息依次对各环节求解,就得到设定条件下的系统响应.

三、通过预报轧制力得出补偿量的前馈控制

轧机厚度调节系统属于一阶无差反馈调节系统,它依据弹跳方程得出厚度偏差来实现调节.对于变化缓慢的扰动,调节效果较好,而对于变化迅速的水印温差扰动,其调节效果却很差.沿用通常的厚差前馈控制方案,也难于得到理想的结果.因为这种方案只把前架来料厚差的波动作为前馈补偿信号,所以只对克服前一架的出口厚差有效.水印温差不仅引起厚度偏差,而且由它造成的硬度变化将随着钢带运行依次影响各架轧机,使每架轧制力都呈周期性变化.取厚差作为前馈量不能检测到这种变化的影响,也不能有效地进行补偿.从分析看出:轧制力的变化既体现了厚差干扰的影响,又包含了水印温差干扰的影响,如果从轧制力的变化中求取前馈补偿量,就可能补偿厚差和水印温差等主要扰动因素的影响.鉴于水印温差干扰在每架都再次出现,对各架都具有同样规律的影响,就是说,由于水印温差干扰的作用使前架轧制力升高(轧过低温段时),那么这个低温段到达后架时也将使后架轧制力升高.因此,根据前一架轧制力产生偏差的规律,预先适当修正后架的轧制力设定值就可能有效地减小后架的出口厚差.

前架的实测轧制力 P_{1r} 相对于设定值 P_{1s} 的变化用校正系数 δ 表示:

$$\delta = P_{1r}/P_{1s} \quad (3.1)$$

在线实测前架的轧制力,由式(3.1)可以得出校正系数 δ 的时间序列.

此校正系数时间序列经适当的延迟后用来预报后架的轧制力,后架轧制力预报值 \hat{P}_2

$$\hat{P}_2 = \delta * P_{2s} \quad (3.2)$$

P_{2s} 为后架轧制力设定值.

由工艺机理知:

$$\Delta s = \Delta p * \frac{M + Q}{M * Q} \quad (3.3)$$

据(3.3)可以将预报值 \hat{P}_2 与设定值 P_{2s} 之间的偏差 $\hat{P}_2 - P_{2s}$, 换算成辊缝调整量 Δs_2 .

$$\Delta s_2 = (\hat{P}_2 - P_{2s}) * \frac{M_2 + Q_2}{M_2 * Q_2} \quad (3.4)$$

将 Δs_2 作为前馈补偿量作用于后架的反馈系统中调整后架的压下,就能适当地补偿扰动对出口板厚的影响.

应该指出,如果直接取 Δs_2 作为前馈量作用于后架,就会由于预报值 \hat{P}_2 和设定值之间总存在偏差,导致即使调节过程结束,仍有恒定的前馈补偿作用于后架压下系统,造成

恒定的出口偏差。为此, 取其对时间的变化率 Δs_2 作为前馈补偿量:

$$\Delta s_2 = \frac{\Delta(\Delta s_2)}{\Delta t} \quad (3.5)$$

这样, 在轧制力没有波动时, 就没有前馈作用, 从而克服了直接取 Δs_2 作为前馈补偿量的弊病。但是 Δs_2 的值在数量上并非完全补偿扰动的影响。所以, 需要乘以适当的增益因子 k , 对前馈量进行必要的修正。通过整定参数 k , 使其实现数量上最合适的补偿。

还须指出, 欲使前馈补偿达到预期的效果, 必须特别注意对前馈量超前于扰动作用时间 τ 的整定。由于马达从接受前馈信号到控制辊缝动作需要一段响应时间。因此前馈控制信号必须超前于扰动作用, 并且, 只有在超前作用时间 τ 选得合适时, 才能在扰动到来的瞬间, 辊缝刚好作相应的调整, 从而恰到好处地补偿扰动的影响。任何时间上的超前或滞后, 都会破坏这种补偿, 使前馈作用反而引起不良的后果。

通过仿真计算可以得出 τ 与 k 的最佳值。对于这类双因素寻优可采用松弛法, 即先固定一个因素, 将问题转化成单因素最优化问题, 通过优选法寻优。再固定这个因素, 优选另一个因素, 如此反复几次, 即可选出适合于本系统的最好的 k 与 τ 的值。所谓最佳是指使评价函数达到最小值。这里, 取出口厚度偏差的绝对值乘以时间权因子对时间的积分值 f 作为系统的评价函数值。

$$f = \int_0^t t * |\Delta h_2| dt \quad (3.6)$$

也就是说, 最好的调节效果应使出口厚度偏差最小。乘以时间权的意义在于更加看重调节过程进入稳态后的偏差。

为了探讨轧制力前馈控制方案的调节效果, 以上钢一厂五机架热连轧机第一、二机架工艺参数为例进行仿真计算, 见表 1。

表 1 上钢一厂第一、二架热连轧机工艺参数表

参数	出口厚度	轧制速度	轧制压力	机架刚度	材料塑性系数
第一机架	11.2mm	1.65m/s	780t	380t/mm	100t/mm
第二机架	7.7mm	2.4m/s	680t	380t/mm	194t/mm

来料规格: $19 \times 1050\text{mm}$, 钢种: A_3 。

假定来料厚度偏差为 0.8mm。水印温差的影响使轧制力波动 20%。根据加热炉结构和轧制速度并参照实际测量结果, 水印温差可看作周期约 4.7 秒的正弦干扰。在张力恒定的条件下, 为了节省计算时间, 仿真模型省略了活套调节系统。不过, 这些轧制条件的模拟和有异于真实情况的简化, 对于研究该系统的厚调作用没有本质的影响。

为了考察轧制力前馈控制系统的调节功能, 分别在原系统和经过改进后的轧制力前馈控制系统(参数取优选得到的最佳值 $k = 0.043$, $\tau = 0.48$) 上进行模拟轧钢试验。仿真计算的结果表明: 在原系统中水印温差干扰造成的厚差较大(未考虑来料厚差), 出口厚差幅值为 0.113mm, 呈周期性波动。输出厚差变化曲线如图 2 曲线 A 所示。评价函数值为 279.036。施行轧制力前馈控制后, 进行完全相同的试验, 仿真计算的结果表明: 由

于进行了合适的前馈补偿,达到稳态后,最大出口偏差减小为 0.039mm,基本上消除了水印温差干扰。评价函数值为 71.4591。很显然,在控制精度上,加入轧制力前馈补偿的系统,较原系统有显著的提高。在水印温差严重的情况下尤为突出。

四、轧制力前馈控制中预报轧制力的自适应校正

1. 本块钢的轧制力自适应

如前所述轧制力前馈补偿可在消除水印温差干扰方面取得显著的效果。但这种仅仅依据前架的实测轧制力来预报后架轧制力的方式毕竟比较粗糙,只是一种预估,仅能反映调整的趋势。因为,一方面为保证前一架厚调精度,保留了反馈 AGC 控制功能。这样,轧制力的变化既包含着水印温差干扰的信息,又处在 AGC 系统的随时调整中,并不能很准确地体现水印温差干扰的影响。另一方面,仅仅依据前架轧制力的预报,不能根据实际情况及时进行校正。据此作者提出了下一架轧制力的自适应跟踪问题。即按照前架轧制力的变化来估计后架的调整趋势。再根据后架的实际情况修正估计值,得出更合适的前馈补偿量。这里,我们取各种影响的综合效果,即以后架的出口厚差作为校正的依据。这种自适应校正不仅能弥补轧制力预报不准的缺陷,而且能进一步消除由于其他形式的扰动及工况漂移等干扰对轧制精度的影响。为便于在线应用,采用了固定滤波增益因子的指数平滑法。具体作法是:

在轧制过程中,实测第 i 时刻后架实际轧出厚度 $h_2(i)$ 。由后架设定厚度 h_{2s} 可得出自适应系数在第 i 时刻的测量值 $\alpha_2(i)$

$$\alpha_2(i) = h_2(i)/h_{2s}. \quad (4.1)$$

设 $\hat{\alpha}(i)$ 为自适应系数在第 i 时刻的预报值(初始时刻的预报值设为 1)。那么,下时刻自适应系数为 $\hat{\alpha}(i+1)$,

$$\hat{\alpha}(i+1) = \hat{\alpha}(i) + \beta * (\alpha_2(i) - \hat{\alpha}(i)) \quad (4.2)$$

其中 β 为滤波增益因子,可在 0—1 之间选取,初步可定为 0.382。

若轧制力自适应预报值为 $\tilde{P}_2(i+2)$ 则:

$$\tilde{P}_2(i+2) = \hat{P}_2(i+2) * \hat{\alpha}(i+1). \quad (4.3)$$

也就是用前一时间 ($i+1$ 时刻)得到的自适应系数,对当前时刻 ($i+2$ 时刻)的预报值进行了自适应校正。从而使后架轧制力预报更接近实际值,前馈量更准确。

为了检验本方案的实际效果,我们在轧制力前馈补偿的基础上,进一步增加了自适应校正,并在与前述完全相同的轧制条件下模拟轧钢。仿真计算表明:由于增加了自适应校正功能,进一步提高了控制精度。最大出口厚度偏差不超过 0.036mm,一般被控制在 0.03mm 以下。其输出厚差如图 2 曲线 B 所示。评价函数值为 69.2553。这里,由于前馈补偿已将出口厚差基本控制在死区范围 0.02mm 以内,故自适应效果不很显著。仿真计算表明,当存在其他形式的未能预测的干扰使轧制力前馈方案不能满意地实施控制的情况时,轧制力自适应跟踪就显示出突出的作用。

2. 最佳增益因子 β 的选取(下块钢自适应)

理论和实践表明,在指数平滑公式的应用中,增益因子 β 的取值,将直接影响自适应

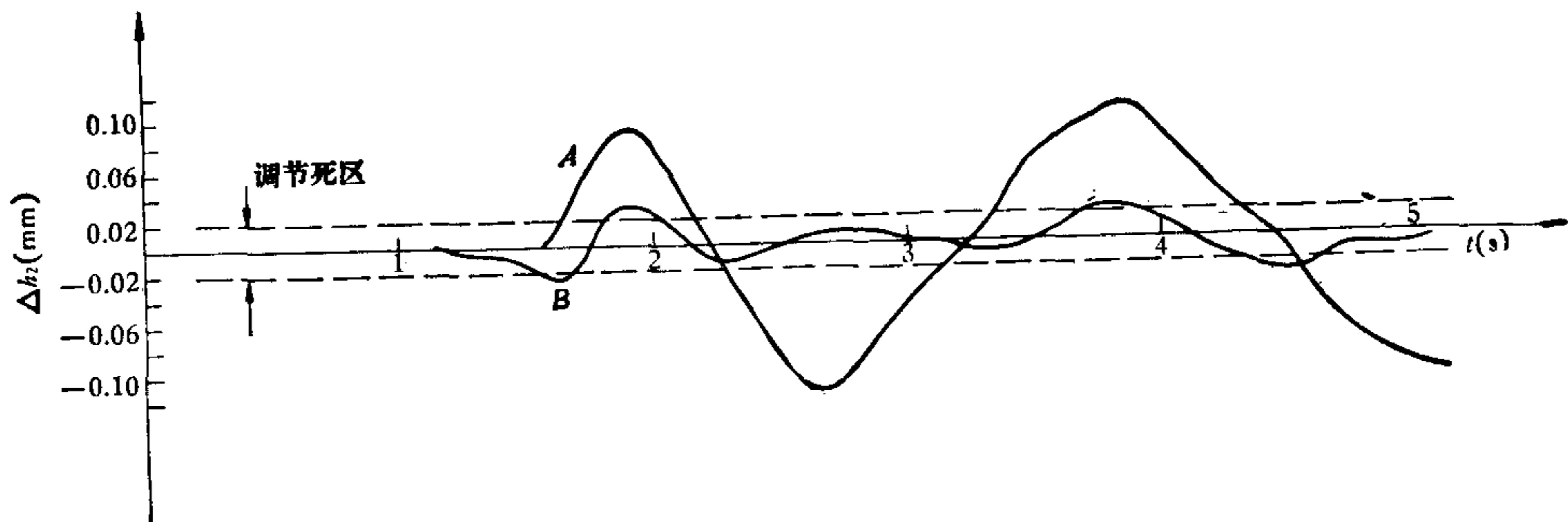


图2 仅有水印温差干扰的情况下、系统改进前后的调节效果比较

控制的效果。因此,需设法寻求最佳的 β 值。此处以残差(预报值与实测值之差)平方和最小的原则来选取最佳的自适应增益因子 β 值。具体作法是:

在轧制过程中,当系统基本进入稳态以后,分别对预报轧制力、实测轧制力及自适应系数的测量值进行采样和记录。通常可取二十点,得到下述各种参数的时间序列:

1) 轧制力实测值序列

$$P_{2t}(i+2b), P_{2t}(i+3b), \dots, P_{2t}(i+21b).$$

其中: i 为起始时刻; b 为采样时间间隔; $P_{2t}(i+2b)$ 为 $i+2b$ 时刻后架的实测轧制力,其余类推,均通过采样得到。

2) 轧制力预报值序列

$$\hat{P}_2(i+2b), \hat{P}_2(i+3b), \dots, \hat{P}_2(i+21b).$$

该序列由前架轧制力实测值序列 $P_{1t}(i+2b), P_{1t}(i+3b), \dots, P_{1t}(i+21b)$,及校正系数序列 $\delta(i+2b), \delta(i+3b), \dots, \delta(i+21b)$ 代入(3.2)式得出。

3) 自适应系数预报值序列

$$\hat{\alpha}(i+b), \hat{\alpha}(i+2b), \dots, \hat{\alpha}(i+20b).$$

由着眼于最终轧制效果,通过实测出口厚度由式(4.1)算得自适应系数测量值序列 $\alpha_t(i), \alpha_t(i+b), \dots, \alpha_t(i+19b)$,将其代入式(4.2)迭代计算得出。

4) 自适应系数实测值序列

$$\alpha_t(i+b), \alpha_t(i+2b), \dots, \alpha_t(i+20b).$$

由于用自适应系数修正轧制力预报值,因此实测值应通过轧制力求取。根据得到的轧制力实测值序列和轧制力预报值序列由式

$$\alpha_t(j-1) = P_{2t}(j) / \hat{P}_2(j) \quad (4.4)$$

计算得出。

按照残差平方和最小的准则,应使

$$W(\beta) = \sum_{t=i+b}^{i+20b} (\alpha_t(t) - \hat{\alpha}(t))^2 = \min \quad (4.5)$$

由于 $W(\beta)$ 是一个没有具体表达式的函数,只得采用试探方法搜寻,为了能以最少的搜寻步骤得出理想的结果,搜寻过程采用优选法进行。每一个确定的 β 都可以算出对应的 $W(\beta)$ 值。用优选法在0—1之间选取不同的 β 值进行试探比较,找出使 $W(\beta)$ 达到最

小的 β 值就是最佳的增益因子。将这样得到的 β 值应用于相同条件的下块钢的轧制中即可改善自适应效果,得到比原定 β 的情况下更高的轧制精度。

我们用此方法在原来构造的轧制力前馈自适应系统上进行了试验。仿真计算表明:无论 β 初值选用何值(曾分别用 0.38, 0.5, 0.7 等进行过试验),对于一个噪声方差已经确定的系统,一般经一、二次试验就能找到该系统最佳 β 值。将这个值代入系统,通常都能改善自适应效果,取得比经验设定 β 时更高的轧制精度。

在原轧制条件下(β 初值取 0.38)计算结果如前所述。进一步采取了下块钢自适应措施,经一次试轧后,选出 $\beta = 0.486831$,再以此值代入系统,轧制效果较原来为好,出口偏差幅值基本控制在死区范围以内。评价函数值 69.0182,再次自动选 β 仍为 0.486831。即一次就已搜寻到最优的 β 值。

为了全面考核系统改进后的效果,假定来料不仅有水印温差干扰,而且有 0.8mm 的厚差干扰。仿真计算结果表明用原反馈系统试行轧制,出口厚度偏差以幅值 $\pm 0.115\text{mm}$ 左右波动。评价函数值为 290.403。而系统增加轧制力补偿本块钢及下块钢自适应校正功能后,出口厚度偏差幅值降为 0.043mm,大多进入死区,无明显周期性波动。评价函数值降为 86.9801,输出厚度偏差如图 3 所示。其中曲线 E 为系统改进前的控制情况,曲线 F 为系统改进后的情况。显然,由于采取了文中提出的一系列改进系统的措施,控制精度得到显著的提高。

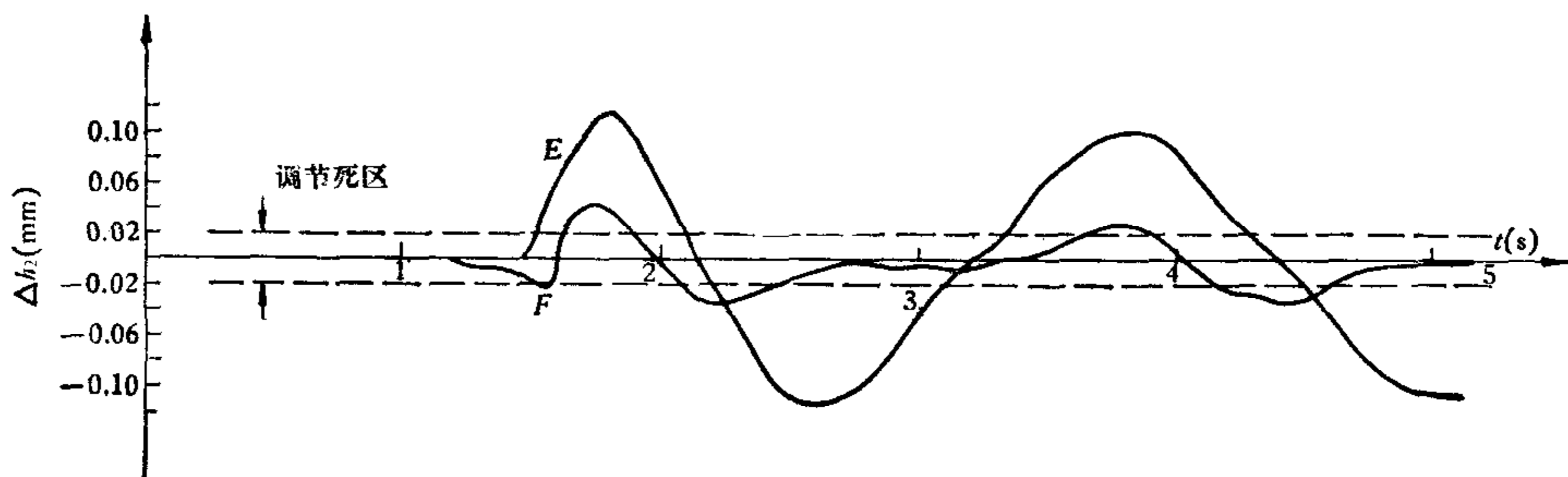


图 3 既有水印温差干扰又有厚差干扰的情况下,系统改进前后调节效果比较

五、结 语

(1) 本文提出的轧制力自适应前馈补偿方法,用于克服水印温差干扰,提高轧制精度具有显著的效果。

(2) 本文提供的方法,除轧制力前馈补偿外还采取了本块钢及下块钢自适应改进前馈功能的措施。因而,不仅对于克服水印温差干扰,而且对其他形式的扰动及系统工况漂移等都具有良好的校正作用。

(3) 本文提出的方法,算法比较简单,易于实现在线控制。可以用微型机来实现文中所述的数学运算,如果原来系统已经应用电子计算机实现了 DDC-AGC 功能,则只需增加少量相应功能程序,就可以实现文中提出的自适应前馈控制。

参 考 文 献

- [1] 陈振宇,热、冷连轧机 AGC 系统的仿真研究,冶金自动化,1980 年第四期.
- [2] 杨自厚,热连轧机 AGC 系统,东北工学院学报,1979 年第二期.
- [3] 美板佳助[日],控制理论在轧制过程自动化中的应用,国外冶金自动化, No. 4, 1978.

THE SIMULATIVE STUDY OF ADAPTIVE FEEDFORWARD AGC SYSTEM OF HOT STRIP MILLS

CHEN ZHENYU ZHANG XIANDONG

(Institute of Automation, Ministry of Metallurgy)

ABSTRACT

This paper gives the investigation of AGC system of hot strip mills by digital simulation, and the aim is to overcome the temperature disturbances especially caused by the skid marks. The new control method introduces the feedforward signal into the control loop. The features are to measure the rolling force of front stand and to forecast the rolling force of next stand for feedforward compensation by adaptive correction, and to select the gain factor of adaptive filter by residual minimisation. The result of simulative calculation has shown that the new control method can improve the control precision distinctly when the system is under disturbance of skid marks.