

# 动态系统最优化理论与自适应算法 在轧钢中的应用

张迪生 梁启宏 何志明

(北京理工大学自动控制系, 100081)

## 摘 要

本文就自行研制的轧机计算机厚度控制系统,应用动态规划、随机最优控制理论与自适应算法,在轧制规程和厚度分配的最优化计算、轧制规程在线修正与自动厚度控制的改进算法几方面进行了研究,使轧机的厚度控制精度有了显著的提高。应用结果表明,普碳钢卷板的纵向同板差精度 $\leq 80\mu\text{m}$ ,命中目标厚度精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

**关键词:** 轧机,厚度控制,动态系统,最优化。

## 一、引 言

作者研制的国内第一套宽带钢轧机液压压下计算机厚度控制系统<sup>1)</sup>于1989年6月3日在太钢五轧厂1700mm炉卷轧机上成功地投入运行。该系统的被控对象是太原钢铁公司于50年代由苏联引进的四辊炉卷轧机,该设备陈旧,测试手段不齐全,传动部分的同步性能和其它机械性能均未达到设计标准。不难想象,在此设备上通过计算机控制改善带钢质量,对计算机厚控系统的性能要求是很高的。作者应用动态规划、随机最优控制理论与自适应算法以及先进的技术手段,使轧机的厚度控制精度有了显著的提高<sup>[1]</sup>。

## 二、轧制规程和厚度分配的最优化计算<sup>[2]</sup>

卷板坯料从加热炉出炉后,经高压水除磷、二辊和万能轧机分别进行多道次轧制后由辊道传送到炉卷轧机,精轧成产品后送端卷卷成成形卷。由于不锈钢生产的终轧温度过低(低于 $800^{\circ}\text{C}$ ),造成应力过大而降低了产品的各项指标。为降低能耗、提高产品质量,应用动态规划实现三台轧机的轧制规程最优化,对整个生产线实现轧件在三台轧机上厚度分配最优化,指标为保证终轧温度( $840^{\circ}\text{C}$ )的条件下,使坯料的出炉温度最低。

选取各道次带钢出口厚度 $h_k$ 和温度 $T_k$ 作为状态,控制变量为各道次压下量 $\Delta h_k$ ,

本文于1991年8月15日收到。

1) 此项目已于1991年1月13日通过了冶金部与机电部的联合技术鉴定。项目负责人为吴沧浦,项目参加人员有张迪生,梁启宏等14人。该轧机计算机控制装置的研制成功为本文提供了实践基础。

轧制速度  $v_k$  和前后卷取张力  $F_{fk}$  和  $F_{bk}$ , 即

$$X_k = [h_k, T_k]^T, \quad (1)$$

$$U_k = [\Delta h_k, v_k, F_{fk}, F_{bk}]^T. \quad (2)$$

状态转移方程为

$$h_{k+1} = h_k - \Delta h_k, \quad (3)$$

$$T_{k+1} = T_k - f(X_k, U_k) - g(X_k, U_k) + H(X_k, U_k). \quad (4)$$

约束条件为对轧制压力  $P$ 、力矩  $M$ 、轧制功率  $N$ 、轧制速度  $v$ 、相对压下率  $\varepsilon\%$  等由工艺确定的限制。指标函数为

$$J = \text{Min} \sum_{k=1}^{N-1} (T_k - T_{k+1}). \quad (5)$$

应用动态规划算法解以上不定期多段决策过程, 便可得到各台轧机的最优轧制规程。

带钢在整个生产线上总的温降由下面六部分组成: 加热炉出口至二辊轧机传送过程中的温降  $\Delta T_1$ 、二辊轧机轧制过程中的温降  $\Delta T_2$ 、二辊至万能轧机传送过程中温降  $\Delta T_3$ 、万能轧机轧制过程中的温降  $\Delta T_4$ 、万能至炉卷轧机传送中的温降  $\Delta T_5$  及炉卷轧机轧制过程中的温降  $\Delta T_6$ 。这些变量是带钢在三台轧机开轧时的入口厚度和入口温度的函数。总温降  $\Delta T$  由下式给出:

$$\Delta T = \Delta T_1(H, T) + \Delta T_2(H, h_N^1, T_N^1) + \Delta T_3(h_N^1, T_N^1) + \Delta T_4(h_N^1, h_N^2, T_N^1 - \Delta T_3) + \Delta T_5(h_N^2, T_N^2) + \Delta T_6(h_N^2, h_N^3, T_N^2 - \Delta T_5). \quad (6)$$

式中,  $T$  为热坯出炉温度;  $h_N^i, T_N^i$  分别为热坯在第  $i$  台轧机的出口厚度与出口温度。厚度分配最优化指标函数为

$$J = \text{Min}_{h_N^1, h_N^2, h_N^3, T_N^1, T_N^2, T_N^3} \Delta T. \quad (7)$$

在三台轧机最优化轧制规程的基础上应用非线性规划算法便可求出带钢在三台轧机上的最优厚度分配值, 结果使得带钢温降减少  $50^\circ\text{C}$  左右。

以上所用的轧制机理模型均由计算机现场采样数据后辨识得到。

### 三、轧制规程在线修正

轧制规程一定后, 轧制过程的设定值均已确定。但由于模型误差及不可测干扰, 使设定值不准确、产品无法命中目标厚度。对此, 采用随机控制理论给出轧制规程在线修正算法, 从而使产品命中目标厚度的精度提高。

随机控制模型的一种提法为: 取状态变量为各道次出口厚度  $h_k$ 、轧制压力  $P_k$ 、轧制温度  $T_k$ , 决策变量取为辊缝修正量  $\Delta S_k$ 、轧制速度修正量  $\Delta v_k$  和张力的修正量  $\Delta F_{fk}$  与  $\Delta F_{bk}$ , 即

$$X_k = [h_k, P_k, T_k]^T, \quad (8)$$

$$U_k = [\Delta S_k, \Delta v_k, \Delta F_{fk}, \Delta F_{bk}]^T. \quad (9)$$

状态方程为

$$h_{k+1} = S_k + U_k^1 + \left( P_k - \frac{CQ}{C+Q} U_k^2 \right) / C + \xi_k^h, \quad (10)$$

$$P_{k+1} = f_P(X_k, U_k) + \xi_k^P, \quad (11)$$

$$T_{k+1} = f_T(X_k, U_k) + \xi_k^T. \quad (12)$$

式中  $\xi$  为干扰项,  $C$  是刚度系数,  $Q$  是塑性系数. 测量方程为

$$\tilde{P}_k = A_{CF}^k P_k, \quad (13)$$

$$\tilde{T}_k = B_{CF}^k T_k. \quad (14)$$

其中  $A_{CF}^k, B_{CF}^k$  分别为第  $k$  道次到上块钢轧制时, 轧制力和温度模型的自适应修正增益,  $\tilde{P}_k, \tilde{T}_k$  分别是压力与温度的测量值.

$$A_{CF}^k(n+1) = A_{CF}^k(n) + \alpha_k \left( \frac{\tilde{P}_k(n)}{P_k(n)} - A_{CF}^k(n) \right), \quad (15)$$

$$B_{CF}^k(n+1) = B_{CF}^k(n) + \beta_k \left( \frac{\tilde{T}_k(n)}{T_k(n)} - B_{CF}^k(n) \right), \quad (16)$$

式中,  $n$  为轧制序号, 指标函数为

$$J_0(\rho(0, N)) = E_{x_1, \{\omega^k\}} \left\{ \sum_{k=1}^N [(X_k^1 - \bar{X}_k^1)^2 + U_k^T R_k U_k] \right\}, \quad (17)$$

其中  $\bar{X}_k^1$  是厚度目标值,  $\omega^k = [\xi_k^h, \xi_k^P, \xi_k^T]^T$  为统计独立的随机变量. 根据状态信息不完整的随机控制理论<sup>[3]</sup> 将上述模型改造为新的动态规划模型, 使得该模型中的状态完全可测知. 由现场数据可以求得近似的条件概率  $P(x^k | I^k)$ , 把它作为充分统计量. 由此可得 D.P. 方程

$$V_k(P(x^k | I^k)) = \text{Min}_{z^k, z^{k+1}} [E \{ (x_1^k - \bar{x}_1^k)^2 + u^{kT} R_k u^k + V_{k+1}[\tau_k(P(x^k | I^k), u^k, z^{k+1}) | I^k, u^k] | u^k \in U_k], \quad (18)$$

$$V_N(P(x^N | I^N)) = \text{Min}_{x^N} \{ E [(x_1^N - \bar{x}_1^N)^2 + u^N R_N u^N | I^N, u^N] | u^N \in U_N \}, \quad (19)$$

式中,  $I^k$  为信息,  $\tau_k$  为根据模型所得转移率. 解上述 D.P. 方程可求得原随机最优控制问题的最优解.

#### 四、自动厚度控制的改进算法

由于压力反馈自动厚度控制 (AGC) 算法具有操作复杂、稳定性差等缺点, 使得国内自行改造的液压微调压下系统的 AGC 运行率低于 2—3%. 因此提出如下改进算法:

BISRA 公式为

$$h = S(P, B) + S + S_0 + A, \quad (20)$$

式中,  $S(P, B)$  为机架弹性变形;  $B$  为轧件宽度;  $S_0$  为辊缝基值;  $S$  为辊缝值;  $A$  为考虑冷热辊形、轧辊磨损、油膜厚度等原因引入的综合修正系数. 由于工作时轧制压力的变化一般小于其平均值的 15%, 所以, 可在工作点上把弹跳量作线性化处理, 从而得增量方程

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{C} + \Delta S + \Delta A, \quad (21)$$

式中,  $C = \left[ \frac{\partial S(P, B)}{\partial P} \right]^{-1}$ , 只考虑弹跳量  $\frac{\Delta P}{C}$  时的  $P-H$  图见图 1.

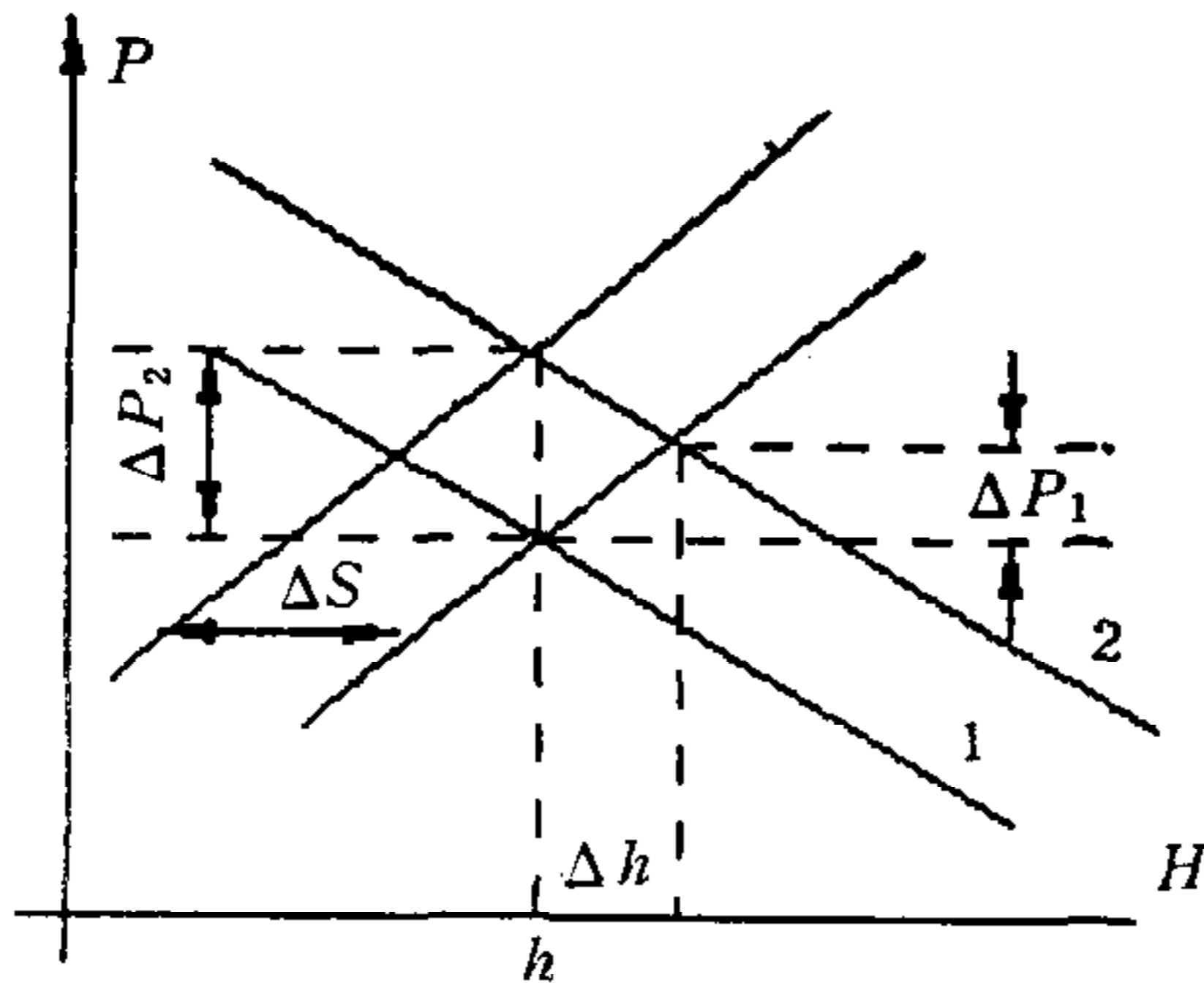


图 1 P-H 图

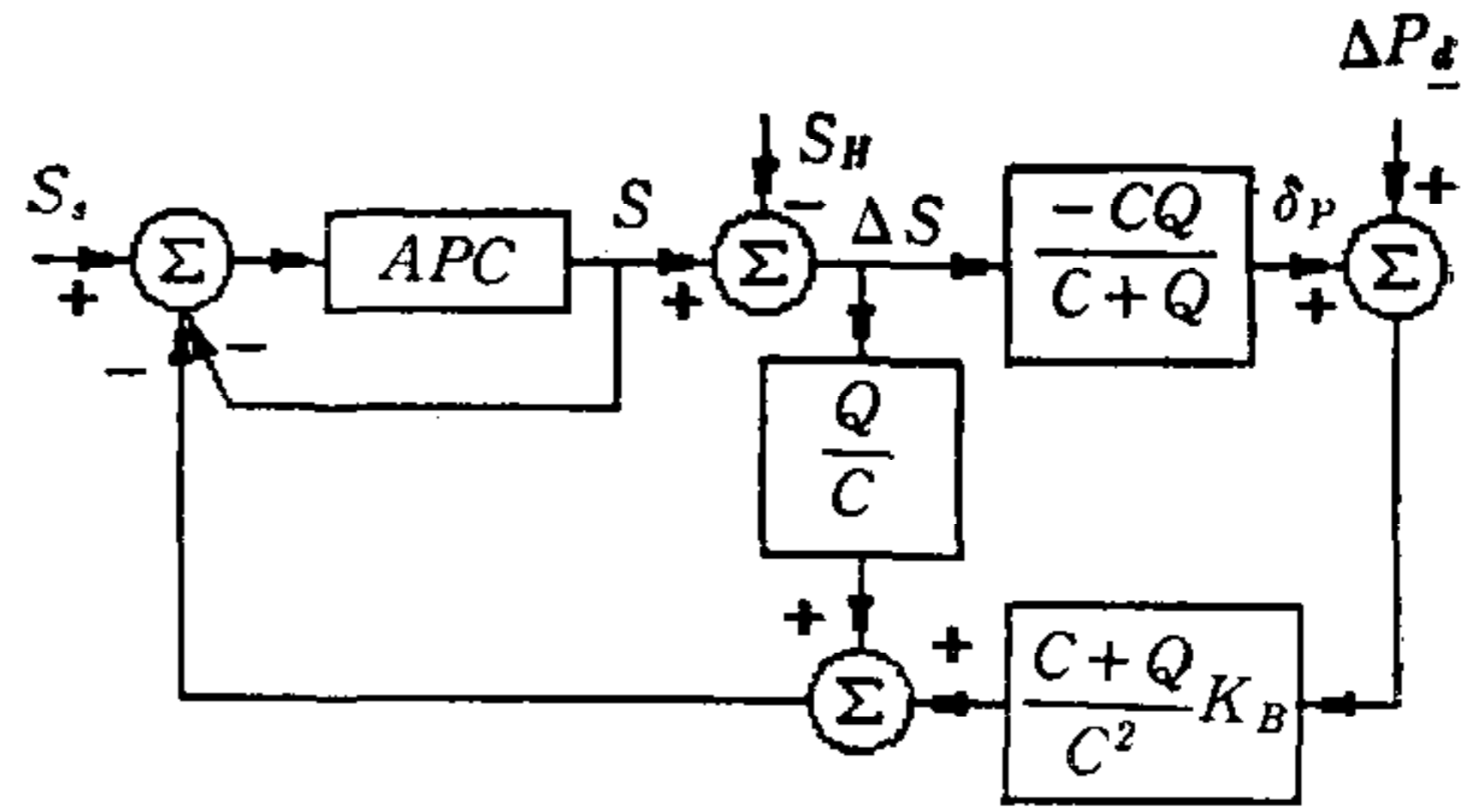


图 2 AGC 算法结构

根据轧制工艺过程分析,轧制力方程可表示为

$$P = \varphi(H, h, B, T, \nu, F_f, F_b, \sigma), \tag{22}$$

式中,  $H$  为入口厚度,  $\sigma$  为材质。在工作点上线性化后与 (21) 式联立求解得厚差估计表达式

$$\Delta h = \frac{C}{C+Q} \left[ \Delta S + \frac{1}{C} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial \varphi}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial \varphi}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial \varphi}{\partial \nu} \Delta \nu + \frac{\partial \varphi}{\partial F_f} \Delta F_f + \frac{\partial \varphi}{\partial F_b} \Delta F_b + \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \Delta \sigma \right) \right], \tag{23}$$

其中  $Q = -\frac{\partial \varphi}{\partial h}$ .

当带钢头部越过轧机时,采集头部的压力  $P_H$ 、辊缝  $S_H$  及厚差  $\Delta h_H$ 。定义增量

$$\Delta P = P - P_H, \Delta S = S - S_H. \tag{24}$$

注意,这里的增量是相对于头部某固定点,和线性化增量不同。把 (24) 式代入 (21) 式就得到了带钢头部以后各个点的厚度与头部厚度的差值  $\Delta h$ , 由此厚差形成的控制算法结构如图 2 所示(图 2 中的  $\Delta P_\delta$  为压力干扰)。为保证全局稳定,在压力反馈回路中加入修正系数  $K_B$ ,一般  $K_B$  取在 0.8—0.9 之间。

为了获得更好的控制效果,实时识别 (23) 式的各个系数,以给出具有预报特性的厚差估计值,形成自适应厚差估计器 AGC 算法。

上述 AGC 算法不改变原 APC 位置闭环,只加入一定限量的补偿值。AGC 轧制时不再需要设定压力,操作方式、习惯与 APC 时完全相同,从而使 AGC 运行率达 85% 以上。

## 五、应用结果

应用 AGC 轧制不锈钢的纵向同板差统计结果如图 3 所示,图中同时还给出了自动位置控制 (APC) 轧制不锈钢的统计结果;实测的典型厚差记录曲线<sup>1)</sup>如图 4 所示;统计

1) 所有的厚差记录曲线都是用 TOSHIBA TOSGAGE-306A X-射线测厚仪记录的。

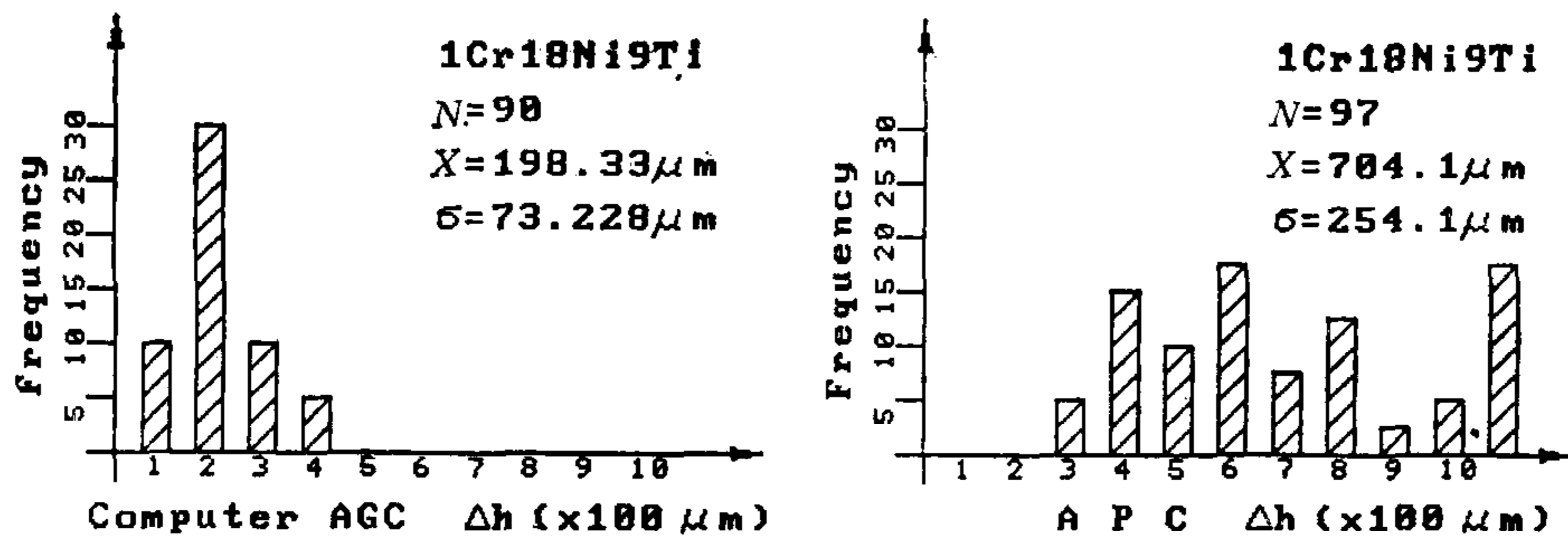


图3 不锈钢纵向同板差统计结果

结果表明: 普板的纵向同板差精度  $\leq 80 \mu\text{m}$ , 不锈钢的纵向同板差精度  $\leq 200 \mu\text{m}$ 。命中目标厚度的实际测试结果如表 1 所示, 大批量的产品统计表明, 命中厚度精度为  $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

表 1 命中厚度实测数据

钢号	道次	1	2	3	4	5
1	Ss	1055	856	807	756	756
	Psum	1294	1317	1144	841	563
	AGC	0	17	18	23	22
	Hdif					9
2	Ss	1055	857	807	756	756
	Psum	1300	1262	1143	757	557
	AGC	0	19	21	23	21
	Hdif					-15
3	Ss	1056	857	807	756	756
	Psum	1323	1244	1186	765	505
	AGC	0	11	15	16	14
	Hdif					-50
4	Ss	1056	856	807	756	756
	Psum	1361	1265	1174	787	446
	AGC	0	14	16	18	16
	Hdif					-55
5	Ss	1056	857	807	756	756
	Psum	1347	1255	1186	797	446
	AGC	0	10	10	10	10
	Hdif					-5
6	Ss	1056	856	807	756	756
	Psum	1325	1276	1207	793	539
	AGC	0	7	7	7	7
	Hdif					-76

表中: Ss——辊缝设定值(丝米); Psum——压力值 ( $10^4$  牛顿); AGC——辊缝补偿值(丝米); Hdif——厚度均值(微米)。



图 4 实测 3mm 钢板厚差记录曲线

该系统从 1989 年 6 月 3 日投入运行到 1990 年 11 月止,共轧制各种钢材 41 万吨,取得了 215.4 万元的直接年经济效益。

以上研究成果已于 1991 年 7 月成功地推广到马钢四辊中板轧机液压压下计算机控制系统中。

### 参 考 文 献

- [1] 梁启宏,张迪生等,轧机液压压下计算机控制系统,北京理工大学学报,11(1991),(1),111—114.
- [2] 张迪生等,动态规划在轧制规程最优化中的应用,信息与控制,13(1984),(4),1—6.
- [3] 吴沧浦,最优控制的理论与方法,国防工业出版社,1989.

## THE APPLICATION OF DYNAMIC SYSTEM OPTIMIZATION AND ADAPTIVE ALGORITHM IN HOT ROLLING

ZHANG DISHENG LIANG QIHONG HE ZHIMING

(Dept of Automatic Control Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

### ABSTRACT

Based on dynamic programming, stochastic optimal control theories and adaptive algorithm, some research work on the computer control system for a hot strip finishing mills is described in this paper, which mainly includes the optimum rolling schedules of strip rolling mills and the optimal calculation of allocating thickness in three rolling mills on one process line, the adaptive method of rolling schedules, and the improved formulating of automatic gauge control (AGC). The thickness control quality of the hot strip mills has been improved remarkably. The application shows that the thickness variation in length of strip is less than 0.08mm and the precision hitting the thickness target is in  $\pm 0.1\text{mm}$ .

**Key words :** Rolling mills thickness control; dynamic system; optimization.



**张迪生** 1951 年生于天津市, 毕业于东北工学院冶金自动化仪表专业, 1982 年、1989 年在北京理工大学获自控专业硕士、博士学位。现为北京理工大学自控系副研究员。主要研究领域为冶金工业过程建模与计算机控制, 工业大系统理论、最优控制理论与方法及其工业应用, 从事系统辨识的教学工作。



**梁启宏** 山东省日照市人, 毕业于山东矿业学院, 留校讲授自动控制系统等课程。1986 年考入北京理工大学自控专业攻硕士学位, 1988 年转攻博士学位, 1991 年毕业获工学博士学位。现为北京理工大学自控系讲师, 主要从事计算机控制、工业自动化、最优控制、非线性系统等方面的研究与教学工作。



**何志明** 天津市人。1978 至 1982 年在天津南开大学数学系数学专业学习, 1982 年至 1984 年在北京理工大学自动控制系学习。后留校从事应用数学以及最优化理论与方法等方面的教学与研究。主要兴趣为: 最优化理论与方法, 随机系统理论与应用, 概率论与随机过程, 数理统计等。