

模型辨识中几种参数自适应跟踪方法的探讨*

潘德惠

(东北工学院)

何德铸

(北京钢铁学院)

摘 要

本文对一种常用的自适应算法的理论依据提出了我们的看法。同时提出了模型参数动态修正的几个较简易有效的自适应跟踪的方案,及一些在轧钢生产方面实际试验和计算的例子。

一、前 言

一些用于自动化过程的数学模型中,往往含有某些参数,这些参数随过程进行常常会有一些变动,如不随时修改,就会使模型偏离实际过程而无法应用。实际上,数学模型中的参数一般有两种:一种是在一个时期内可以认为是不变的静态参数,另一种是随时间推移需要随时修改的动态参数。这种随时修改就是所说的自适应跟踪。本文对一种常用的自适应算法的理论依据提出我们的看法,同时提出模型参数动态修正的几个较简易有效的自适应跟踪方案及一些实际计算和试验的例子。

二、一种常用方法的理论探讨

通常对模型中某个随过程进行而产生漂移的参数 α 往往采用以下的修正算法^[1]。

先设过程开始时此参数值为 α_0 , 代入模型作预报。过程开始后,通过对某些量的实测,求出 α 的“实测值” $\tilde{\alpha}_0$, 取增益系数 $K(0 < K < 1)$, 计算下次预设 α 值为

$$\alpha_1 = \alpha_0 + K(\tilde{\alpha}_0 - \alpha_0),$$

代入模型作预报,过程开始后,得出 α 的“实测值” $\tilde{\alpha}_1$, 则下次预设 α 值为

$$\alpha_2 = \alpha_1 + K(\tilde{\alpha}_1 - \alpha_1),$$

如此继续下去,第 $n + 1$ 次预设 $\alpha = \alpha_n$, 代入模型作预报,再得到 α 的“实测值” $\tilde{\alpha}_n$, 下次预设

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + K(\tilde{\alpha}_n - \alpha_n) \quad (1)$$

继续下去,这个方法许多文献推荐过,而且有不少应用实例,有一定的效果,因此曾引起大家的关注。

* 本文曾在中国自动化学会 1978 年年会上宣读。本文修改稿于 1979 年 1 月 20 日收到。

以轧钢问题为例, 设已建立起估算稳态轧制力的算式

$$P = f(\sigma, H, \Delta L, V, T_0, T_1, R; \dots)$$

式中 P 表示稳态轧制力; σ 是金属变形抗力; H 是轧前板厚; ΔL 是压下量; V 是轧制速度; T_0 和 T_1 是前后张力; R 是轧辊半径. 轧制力的预报值取为

$$\hat{P} = \alpha P$$

α 是动态参数. 轧钢开始时, 先设 $\alpha = \alpha_0$, 比如取 $\alpha_0 = 1$, 估算出第一卷钢的稳态轧制力 P_1 后, 取第一卷钢稳态轧制力的预报值为

$$\hat{P}_1 = \alpha_0 P_1,$$

用它按弹跳方程设定轧机的辊缝. 轧制开始后, 测得稳态轧制力 \tilde{P}_1 , 再求参数 α 的“实测值” $\tilde{\alpha}_0$, 它满足 $\tilde{P}_1 = \tilde{\alpha}_0 P_1$ 的关系, 即

$$\tilde{\alpha}_0 = \frac{\tilde{P}_1}{P_1},$$

预报下一卷钢的稳态轧制力时, 取 α 值为

$$\alpha_1 = \alpha_0 + K(\tilde{\alpha}_0 - \alpha_0),$$

按估算公式得出稳态轧制力的估算值 P_2 后, 取预报稳态轧制力为

$$\hat{P}_2 = \alpha_1 P_2,$$

以此为准设定辊缝, 轧制后测得稳态轧制力 \tilde{P}_2 , 这时 α 的“实测值” $\tilde{\alpha}_1$ 由 $\tilde{P}_2 = \alpha_1 P_2$ 得到, 即

$$\tilde{\alpha}_1 = \frac{\tilde{P}_2}{P_2}$$

……. 第 $n+1$ 卷钢用的 α_n 是由上次的 α_{n-1} 及“实测值” $\tilde{\alpha}_{n-1}$ 由

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} + K(\tilde{\alpha}_{n-1} - \alpha_{n-1})$$

推得的. 第 $n+1$ 卷钢的稳态轧制力估算值为 P_{n+1} , 则预报值取为

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1},$$

用它设定辊缝轧制后, 测得稳态轧制力 \tilde{P}_{n+1} , 求出 α 的“实测值”

$$\tilde{\alpha}_n = \frac{\tilde{P}_{n+1}}{P_{n+1}},$$

用来作下次推算 α_{n+1} 用. 如此继续下去.

这一方法推出的 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}$ 完全取决于初设值 α_0 及历次“实测值” $\tilde{\alpha}_0, \tilde{\alpha}_1, \dots, \tilde{\alpha}_n, \dots$. 我们可以将递推式 (1) 写成

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + K(\tilde{\alpha}_n - \alpha_n) = K\tilde{\alpha}_n + (1 - K)\alpha_n, \quad (2)$$

于是可反复推得

$$\alpha_{n+1} = K\tilde{\alpha}_n + K(1 - K)\tilde{\alpha}_{n-1} + \dots + K(1 - K)^n\tilde{\alpha}_0 + (1 - K)^{n+1}\alpha_0. \quad (3)$$

不难看出, α_{n+1} 正是历次“实测值” $\tilde{\alpha}_n, \tilde{\alpha}_{n-1}, \dots, \tilde{\alpha}_0$ 及初值 α_0 的加权平均, 权分别为 $K, K(1 - K), \dots, K(1 - K)^n$ 及 $(1 - K)^{n+1}$, 总和为

$$K + K(1 - K) + \dots + K(1 - K)^n + (1 - K)^{n+1} = \frac{K[1 - (1 - K)^{n+1}]}{1 - (1 - K)} + (1 - K)^{n+1} = 1,$$

因此 α_{n+1} 是使加权平方和

$$Q = \sum_{i=0}^n (\tilde{\alpha}_i - \alpha)^2 K(1-K)^{n-i} + (\alpha_0 - \alpha)^2 (1-K)^{n+1}$$

取值最小的 α 值. 这是因为令 $\frac{dQ}{d\alpha} = 0$, 即解得 $\alpha = \alpha_{n+1}$ 等于 (3) 式右边算出的值. 上

式又可写成

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i=0}^n \left(\frac{\tilde{P}_{i+1}}{P_{i+1}} - \alpha \right)^2 K(1-K)^{n-i} + \left(\frac{\hat{P}_1}{P_1} - \alpha \right)^2 (1-K)^{n+1} \\ &= \sum_{i=0}^n (\tilde{P}_{i+1} - \alpha P_{i+1})^2 \frac{1}{P_{i+1}^2} K(1-K)^{n-i} + (\hat{P}_1 - \alpha P_1)^2 \frac{1}{P_1^2} (1-K)^{n+1} \quad (4) \end{aligned}$$

取使 (4) 式右边达最小值的 α_{n+1} , 相当于对“采样点” $(P_1, \hat{P}_1), (P_1, \tilde{P}), (P_2, \tilde{P}_2), \dots, (P_{n+1}, \tilde{P}_{n+1})$ 求实测值 \tilde{P} 关于估算值 P 的线性样本回归, $\hat{P} = \alpha P$ 中的回归系数 $\alpha^{[1]}$, 用的是加权最小二乘法, 即

$$\tilde{P}_n = \alpha P_n + \varepsilon_n = \hat{P}_n + \varepsilon_n \quad (n = 1, 2, \dots)$$

ε_n 是预报误差, 对应每对数据分别加权

$$\frac{(1-K)^{n+1}}{P_1^2}, \frac{K(1-K)^n}{P_1^2}, \dots, \frac{K(1-K)}{P_n^2}, \dots, \frac{K}{P_{n+1}^2}$$

轧制同一种钢材, 同一架轧机上各卷钢材的稳态轧制力的估算值 P_1, P_2, \dots, P_{n+1} 的数量级基本不变, 即以上各个权的分母数量级基本相同, 因此按分子取值规律可以看出, 越早出现的数据的权越小, 越靠后出现的数据的权越大. 所以用 $\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} (n = 0, 1, 2, \dots)$ 这个模型预报的轧制力值 \hat{P}_{n+1} 与实测轧制力 \tilde{P}_{n+1} 随着 n 的增大, 总地来说越来越接近. 即随着 n 的增大, 跟踪性能越来越好, 多方面的工作和我们自己的计算都证实了这一点. 后面图 1 和图 2 可以看出它的跟踪效果.

三、几个自适应方案

我们曾用过下边几个方法作参数自适应跟踪计算.

1) 取

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

来预报第 $n+1$ 卷钢的稳态轧制力. α_0 是首先设定的, P_{n+1}, \hat{P}_{n+1} 和 \tilde{P}_{n+1} 分别表示第 $n+1$ 卷钢的稳态轧制力的估算值、预报值和按预报轧制力 \hat{P}_{n+1} 设定辊缝后, 测得的实测稳态轧制力. 选 α_n 使

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n (\tilde{P}_i - \alpha P_i)^2 = \min,$$

即求 \tilde{P} 关于 P 的算式 $\hat{P} = \alpha P$ 的回归系数 α , \tilde{P}_{n+1} 与 P_{n+1} 的关系为

$$\tilde{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} + \varepsilon_{n+1} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

ε_{n+1} 为预报误差, 这时

1) 第一个样本点 (P_1, \hat{P}_1) 特殊一些.

$$\alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{P}_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i^2} \quad (6)$$

为了减少由于计算机字长有限带来的误差,我们将上式改写成

$$\alpha_n = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i P_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2} \quad (7)$$

(7) 式的分子分母都是求 n 个项的平均值,可以用以下的递推方式进行,令

$$\bar{u}_n = \frac{1}{n} (u_1 + u_2 + \cdots + u_n),$$

则

$$\begin{aligned} \bar{u}_{n+1} &= \frac{1}{n+1} (u_1 + u_2 + \cdots + u_n + u_{n+1}) \\ &= \bar{u}_n + \frac{1}{n+1} (u_{n+1} - \bar{u}_n) \end{aligned} \quad (8)$$

2) 取

$$\hat{P}_{n+1} = P_{n+1} + \beta_n \quad (n = 0, 1, 2, \cdots) \quad (9)$$

来预报第 $n+1$ 卷钢的稳态轧制力. 先选取 $\beta_0 = 0$, 依估算的第一卷钢的稳态轧制力 P_1 得出这卷钢的稳态轧制力预报值

$$\hat{P}_1 = P_1 + \beta_0$$

按此设定辊缝轧制后,测得实际轧制力 \tilde{P}_1 时,由

$$\tilde{P}_1 = P_1 + \beta_1$$

得 β_1 . 第二卷钢的估算稳态轧制力为 P_2 , 由此得出这卷钢的稳态轧制力预报值

$$\hat{P}_2 = P_2 + \beta_1$$

以它设定辊缝轧制,又得到实测轧制力 $\tilde{P}_2 \cdots$. 取 β_n 使

$$Q = \sum_{i=1}^n [\tilde{P}_i - (P_i + \beta)]^2 = \min$$

$$\beta_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tilde{P}_i - P_i) \quad (10)$$

也可以写成

$$\beta_n = \overline{(\tilde{P}_n - P_n)} \quad (11)$$

$(\tilde{P}_n - P_n)$ 的平均值可用前述递推式 (8) 来计算,以减小计算误差. 这时第 $n+1$ 卷钢的稳态轧制力的预报值为

$$\hat{P}_{n+1} = P_{n+1} + \beta_n$$

3) 取

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} + \beta_n \quad (n = 0, 1, 2, \cdots) \quad (12)$$

来预报第 $n + 1$ 卷钢的稳态轧制力。开始时预设 α_0 与 β_0 。依估算的第一卷钢的稳态轧制力 P_1 得出这卷钢的稳态轧制力预报值

$$\hat{P}_1 = \alpha_0 P_1 + \beta_0$$

依此设定辊缝轧制后,测得实测轧制力 P_1 时,取 α_1 满足

$$\tilde{P}_1 = \alpha_1 P_1 + \beta_0,$$

第二卷钢的估算稳态轧制力为 P_2 , 取 $\beta_1 = \beta_0$, 并用

$$\hat{P}_2 = \alpha_1 P_2 + \beta_1$$

作为第二卷钢稳态轧制力来设定辊缝,轧制后得实测轧制力 $\tilde{P}_2 \cdots$ 。取 α_n, β_n 使

$$Q = \sum_{i=1}^n [\tilde{P}_i - (\alpha P_i + \beta)]^2 = \min$$

$$\alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{P}_i P_i - n \bar{\tilde{P}}_n \bar{P}_n}{\sum_{i=1}^n P_i^2 - n \bar{P}_n^2} \quad (13)$$

其中

$$\bar{\tilde{P}}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i, \quad \bar{P}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

$$\beta_n = \bar{\tilde{P}}_n - \alpha_n \bar{P}_n, \quad (14)$$

令

$$\overline{(\tilde{P}P)}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i P_i, \quad \overline{(P^2)}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2,$$

则式(13)可写成

$$\alpha_n = \frac{\overline{(\tilde{P}P)}_n - \bar{\tilde{P}}_n \bar{P}_n}{\overline{(P^2)}_n - \bar{P}_n^2} \quad (15)$$

各平均值也用前述递推式(8)来计算,可以减少由于求和项多而计算机字长有限带来的误差。这时取第 $n + 1$ 卷钢的稳态轧制力的预报值为

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} + \beta_n.$$

容易看出,这正是[2]中最小方差滤波的一个特殊问题。取状态向量为 $\mathbf{X}_n = [\alpha_n, \beta_n]^T$, 观测向量(一维)为 $Y_n = \tilde{P}_n$, 于是状态方程及观测方程为

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n$$

$$Y_{n+1} = H_{n+1} \mathbf{X}_{n+1} + V_{n+1},$$

其中观测矩阵 $H = [P_{n+1}, 1]$, V_{n+1} 是观测噪声。只是我们考虑计算方便,未写出用递推增益矩阵求 $\mathbf{X}_n = [\alpha_n, \beta_n]^T$ 估值的形式,而用式(15), (14)和(8)直接递推 α_n, β_n 而已。

以上三种自适应推算 α, β 以及 α 与 β 的方案不限于用来预报同一种钢的稳态轧制力,而且可以用来预报另一钢种的稳态轧制力,但这两种钢的变形抗力差距不应太大,最好硬度逐步过渡。例如已有普通低碳钢的稳态轧制力估算公式,然后将另一钢种的坯料参数和工艺参数代入这个公式,估算出这个钢种的稳态轧制力 P_{n+1} , 用它乘一个参数 α_n

得到该钢种稳态轧制力的预报值, 即

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} \quad (n = 0, 1, 2, \dots),$$

用 \hat{P}_{n+1} 设定辊缝轧制这个钢种, 其实测的稳态轧制力为 \tilde{P}_{n+1} ($n = 0, 1, 2, \dots$), α_n 用前述的式 (7) 定出。

也可用方案 2 或 3 求出 β_n 或 α_n 与 β_n 来预报另一钢种的稳态轧制力

$$\hat{P}_{n+1} = P_{n+1} + \beta_n$$

或

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} + \beta_n,$$

P_{n+1} 可用上述方法估算出。

仿此用某一架轧机的轧制力估算公式来预报另一架轧机的轧制力。

我们也用第二节中所谈到的一般方法作过自适应计算, 也用已有的生产记录数据作过上述各种离线计算, 即只用这些方法修改参数 α , β 或 α 与 β , 只是未用每次作出的下次预报轧制力来设定相应道次的辊缝(因为用的是过去的记录)。但已经可以看出几种方法效果的对比情况。另外还采用了个别方案进行轧制自适应跟踪的试验。上述计算和试验结果都分别列在第五节中。

四、加权自适应方案

第二节中谈到过, 一般自适应算法相当于用加权最小二乘法确定参数 α 值, 如 (4) 式所示, 各项的权为 (4) 式中所写出的形式。

我们可以取 $0 < \rho < 1$ 的数 ρ , 分别用以下的加权最小二乘法来确定参数 α_n , β_n 或 α_n 与 β_n , 同时还作了加权自适应跟踪计算。

1) 用 $\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1}$ 作预报

选 α_n 使

$$Q = \sum_{i=1}^n [\tilde{P}_i - \alpha P_i]^2 \rho^{n-i} = \min$$

式中 \tilde{P}_i 同 P_i 的意义同前, α_0 先设定, 预报式为

$$\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{P}_i P_i \rho^{n-i}}{\sum_{i=1}^n P_i^2 \rho^{n-i}} \quad (16)$$

2) 用 $\hat{P}_{n+1} = P_{n+1} + \beta_n$ 作预报

选 β_n 使

$$Q = \sum_{i=1}^n [\tilde{P}_i - (P_i + \beta)]^2 \rho^{n-i} = \min$$

式中 \tilde{P}_i 及 P_i 的意义同前, β_0 先设定, 轧制力预报式为

$$\hat{P}_{n+1} = P_{n+1} + \beta_n \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\beta_n = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{P}_i - P_i) \rho^{n-i}}{\sum_{i=1}^n \rho^{n-i}} \quad (17)$$

3) 用 $\hat{P}_{n+1} = \alpha_n P_{n+1} + \beta_n$ 作预报
选 α_n, β_n 使

$$Q = \sum_{i=1}^n [\tilde{P}_i - (\alpha P_i + \beta)]^2 \rho^{n-i} = \min$$

先设定 α_0 与 β_0 , 依次仿第三节中所述定 α_1 与 β_1 , 从 $n = 2$ 开始用上式取最小值的原则定 α_n 与 β_n , 得

$$\alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{P}_i P_i \rho^{n-i} - S_n \bar{\tilde{P}}_n(\rho) \bar{P}_n(\rho)}{\sum_{i=1}^n P_i^2 \rho^{n-i} - S_n \bar{P}_n(\rho)^2} \quad (18)$$

$$\beta_n = \bar{\tilde{P}}_n(\rho) - \alpha_n \bar{P}_n(\rho) \quad (19)$$

上二式中 $\bar{\tilde{P}}_n(\rho)$ 及 $\bar{P}_n(\rho)$ 表示加权平均值

$$\bar{\tilde{P}}_n(\rho) = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{P}_i \rho^{n-i}}{\sum_{i=1}^n \rho^{n-i}},$$

$$\bar{P}_n(\rho) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \rho^{n-i}}{\sum_{i=1}^n \rho^{n-i}},$$

$$S_n = 1 + \rho + \rho^2 + \cdots + \rho^{n-1} = \sum_{i=1}^n \rho^{n-i}$$

$$S_n = \frac{1 - \rho^n}{1 - \rho}.$$

将 (18) 式分子分母都除以 S_n , 得

$$\alpha_n = \frac{(\overline{\tilde{P}P})_n(\rho) - \bar{\tilde{P}}_n(\rho) \bar{P}_n(\rho)}{(\overline{P^2})_n(\rho) - \bar{P}_n(\rho)^2} \quad (20)$$

u_1, u_2, \cdots, u_n 的加权平均值可用下式表示

$$\bar{u}_n(\rho) = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \rho^{n-i}}{\sum_{i=1}^n \rho^{n-i}},$$

如用递推式来求加权平均值, 则以上计算可用递推形式实现, 加权平均值的递推算式是:

$$\bar{u}_{n+1}(\rho) = \bar{u}_n(\rho) + \frac{1-\rho}{1-\rho^{n+1}} [u_{n+1} - \bar{u}_n(\rho)] \quad (21)$$

我们认为, 这样的 α_n, β_n 用来作预报, 效果会比第二节中常用的方法有效得多. 因为:

第一, 这个方案对数据加了权, 也体现了“厚今薄古”的思想;

第二, 在实际轧制过程中, 轧辊不断磨损及辊身受热会引起与轧制力无关的测量厚度与计算厚度之间的差别, 此时要用加法来修正; 而对于轧制力模型来说, 轧件的各种不同的变形抗力会造成一个成正比变化的轧制力误差, 因此对计算值要进行乘法修正^[1]. 因而, 调整两个参数, 效果会比调整一个参数好, 前者是 P_n 乘一个参数 α 或是 P_n 加一个参数 β , 后者不仅乘一个参数 α , 还在后边加一个可修改的参数 β .

显然, 以上方案不限于处理轧制力预报问题, 它还可以在多方面应用.

本文所述方法的要点是, 不逐次修改原始模型(估算式)中的某些参数, 而是将它乘一个待修改的参数 α 之后, 来作预报模型; 或用一个待修改的参数 α 乘估算式, 再加上另一个待修改的参数 β 来作预报模型. 这样既不使递推运算复杂化, 又有较好的跟踪效果, 特别是能用一种情况下的估算模型来作另一种情况下的预报.

五、计算与试验

在这方面我们作了两方面的工作, 一是加权和不加权的自适应跟踪计算, 它是在冶金部自动化所的 DJS-130 数字计算机上进行的; 另一是自适应跟踪试验, 它是在北京钢铁学院四机架热连轧试验机组上进行的.

1. 计算

计算是采用西德所提供的, Rasselstein 厂六机架冷连轧机所轧 309 个钢卷中, 2F 类第二、三、五机架和 3W 类第二架的 52 个钢卷的轧制数据. 计算结果以轧制力实测值和计算值的相对百分误差 δ_1

$$\delta_1 = \frac{\tilde{P} - P}{\tilde{P}} \times 100\% \quad (22)$$

和轧制力的实测值和预报值的相对百分误差 δ_2

$$\delta_2 = \frac{\tilde{P} - \hat{P}}{\tilde{P}} \times 100\% \quad (23)$$

表之, 并用它们来比较自适应方案的优劣.

加权与不加权自适应跟踪计算结果如表 1 所列:

轧制力计算是用 2F 类 2 架的数据, 回归所得的轧制力公式. 用这个回归公式计算出 2F-2 架数据的轧制力计算值和实测值相对百分误差的平均值如表 1 中第一行第二列所示. 依此向下的分别为用该公式计算 2F-3, 2F-5, 3W-2 等架数据所得之值. 由于 2F-2 架轧制力公式是坯料变形抗力在一定范围内求得, 在机架不同时因金属加工硬化或钢种不同时, 变形抗力不同所求的轧制力也不同(如表 1 用五架的数据所计算的轧制力与实测轧制力相对百分误差平均值竟高达 543.754%), 有的已经超过了实用价值. 但在采用自适应跟踪计算后, 其相对百分误差可降到 10% 左右(见表 1 第八列). 由此正好说明了当

表 1 加权与不加权自适应跟踪计算结果

所采用数据的钢卷类型及机架号	轧制力实测值与计算值的相对百分误差的平均值 ($\delta_1\%$)	轧制力实测值与经自适应后的预报值的相对百分误差平均值 ($\delta_2\%$)					
		加法自适应 $\hat{P} = P + \beta$	乘法自适应 $\hat{P} = \alpha P$			乘法、加法自适应 $\hat{P} = \alpha P + \beta$	
		加 权	不 加 权 用公式(6) 计 算	加 权 用公式(2) 计 算 $K = 0.382$	加 权 用公式(15) 计 算 $\rho = 0.382$	不 加 权	加 权
2F-2	5.25988	5.25155	5.27594	5.27903	5.26356	5.54709	6.83669
2F-3	37.006	36.1832	37.3042	65.4463	40.0849	11.9798	8.62276
2F-5	543.754	128.798	40.9579	59.7299	42.9127	30.2654	12.313
3W-2	44.528	15.0012	14.8263	13.2236	12.42001	14.1237	9.73387

更换钢种轧制,而又在无合适的数学模型时,如采用自适应跟踪计算,可以使控制取得较好的效果。

在几种自适应跟踪计算中,以加权的乘法、加法自适应计算的效果比较好。

表 1 第一行 2F-2 的各种自适应计算误差平均值变化不大,是因为其公式就是同一批实测数据回归所得,回归系数比较理想,当进行自适应跟踪计算实际就是适应回归系数,最好的情况就是和回归系数一致,其中又以加权加法自适应计算的相对百分误差较小,是由于它补偿了轧辊磨损和发热膨胀而取得的效果。

表 1 中的每个百分误差数值均为 52 个(第八列是 50 个)钢卷百分误差的平均值。

图 1 所示是用 2F-2 架回归的轧制力公式计算 2F 类第五架的数据,其计算值和实测值之间的相对百分误差几乎接近 900%,但是通过加权的乘法、加法自适应跟踪计算后最

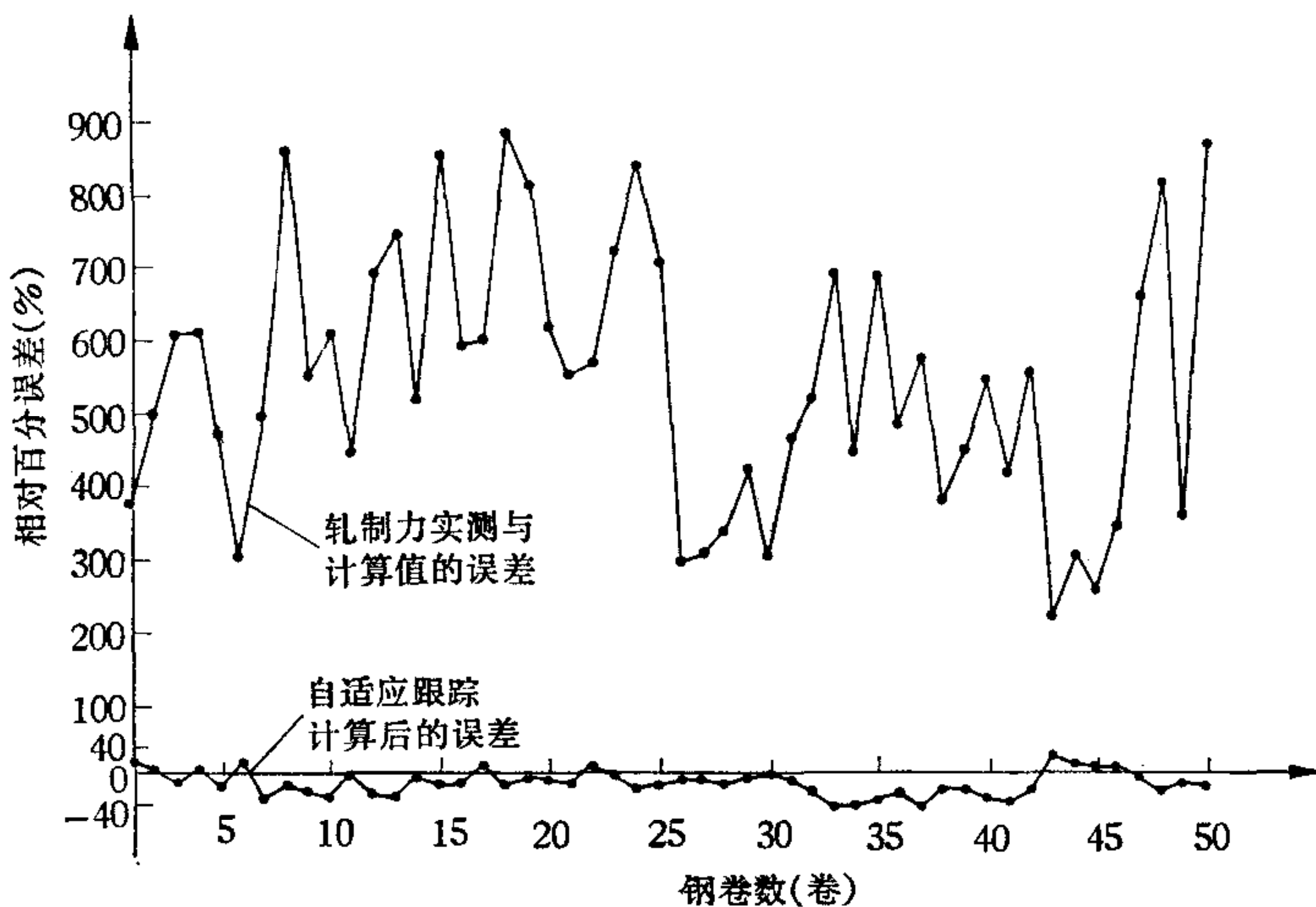


图 1

大也只在 40% 左右，而 50 个钢卷的平均百分误差为 12.313%，其自适应作用从开始就见到了效果。

2. 试验

为了进一步验证自适应的跟踪性能，利用了热连轧数模试验的机会，对四个机架的轧制进行了自适应跟踪试验。根据坯料情况和成品要求，计算机计算出的轧制力通过自适应系数的修正得到预报值。轧件根据预报轧制力设定的辊缝进行轧制，计算机又通过实测的轧制力按上述方法算出新的自适应系数对下块钢的计算轧制力进行修正。

轧制坯料的钢种是 B₃F，而轧制力计算所采用的公式系数是含铜 B₃F，因而计算值偏高，它与实测值之间的相对百分误差也偏大，由于采用了自适应跟踪计算，使预报值与实测值之间的偏差得到了改善。

试验结果如表 2 所列：

表 2 轧钢自适应跟踪计算

轧件组	机架号	轧制力实测值和计算值的相对百分误差平均值 ($\delta_1\%$)	轧制力实测值与经乘法自适应后的预报值的相对百分误差的平均值 ($\delta_2\%$)		备 注
			方 案 一	方 案 二	
第一组	一	15.3531	—	9.27169	本组轧了六块轧件，用方案二进行自适应跟踪。
	二	28.0926	—	9.7726	
	三	8.42289	—	10.2629	
	四	35.7537	—	21.1515	
第二组	一	9.4514	12.1675	—	本组轧了八块轧件，用方案一进行自适应跟踪。
	二	39.7769	13.7313	—	
	三	102.037	33.5032	—	
	四	27.4454	11.0251	—	
第三组	一	14.2788	—	6.52001	本组轧了十块轧件，用方案二进行自适应跟踪。
	二	21.6545	—	11.3794	
	三	30.9183	—	16.9706	
	四	16.1342	—	11.5086	

由于试验条件所限，仅做了三组轧件，同时也只是采用了乘法自适应计算。计算是按前述 (7) 式进行的，并将 (8) 式作了递推运算

方案一、二自适应跟踪的效果由图 2 所示。

图 2 中偏差较大的曲线是轧制力实测值与计算值的相对百分误差，偏差较小的曲线是轧制力实测值与经自适应预报值的相对百分误差。由图中曲线看出虽计算值的偏差很大，但通过自适应跟踪控制使其相对百分误差在二、三块后就减小到 10% 左右。

轧件通过四个机架，并经自适应跟踪控制后，成品厚度满足公差要求。

总之，这里我们仅仅只是进行了一些初步尝试，要满足生产上应用还有不少工作要

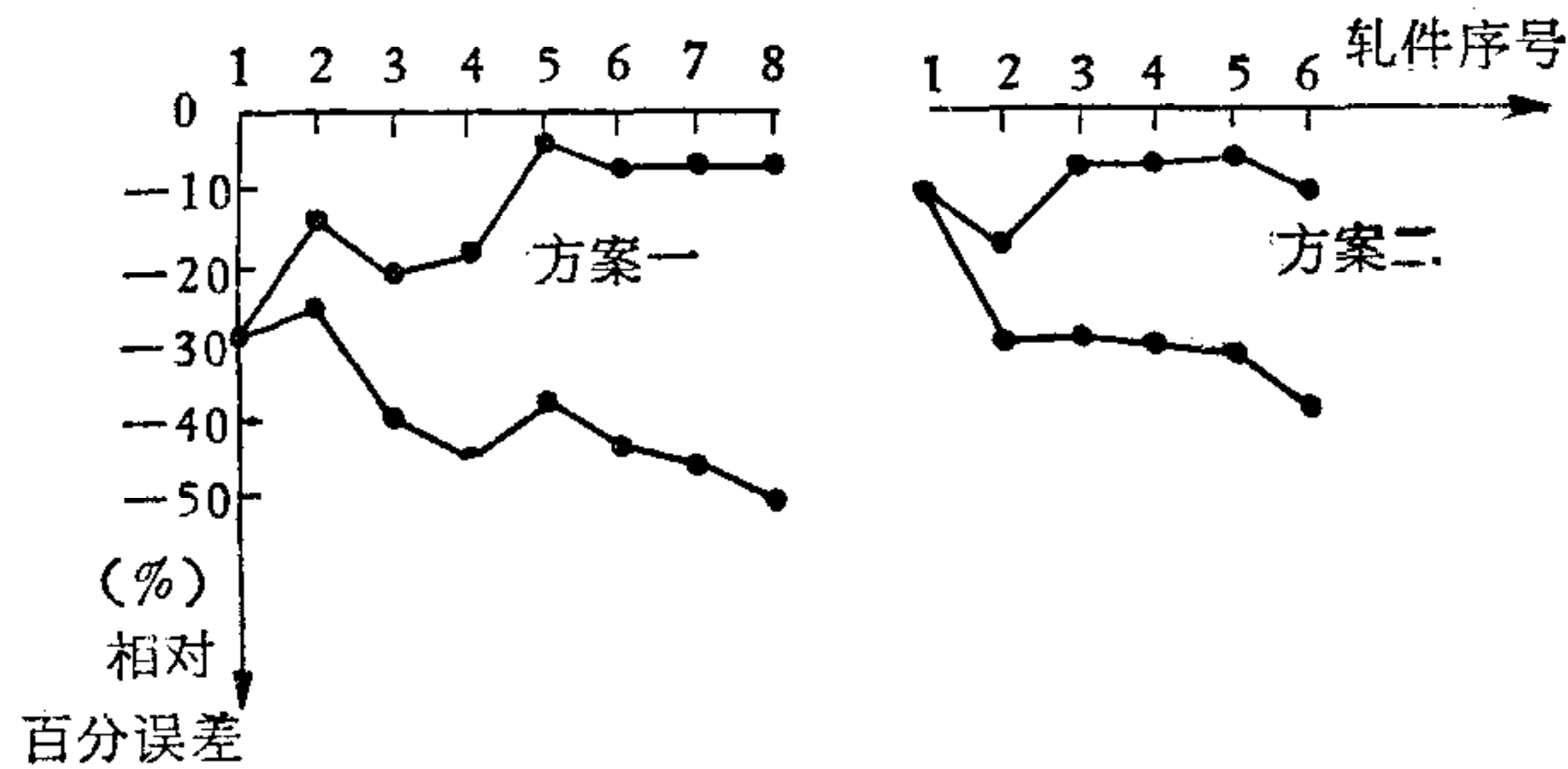


图 2

上二曲线——自适应控制后的误差
下二曲线——轧制力实测与计算的误差

做,而已做的初步工作也一定存在不少问题,请同志们批评指示。

参 考 文 献

- [1] Reiner Stelzer, Jürgen Heidepriem und Friedrich Wilhelm Griese, Adaptivalgorithmen für die Prozeßmodelle einer Rechnergesteuerten Grobblechstraße, *Stahl und Eisen*, **93** (1973) Nr. 23, S. 1100/05.
- [2] 中国科学院数学研究所概率组, 离散时间系统滤波的数学方法, 国防工业出版社, (1975).

THE STUDY OF SOME METHODS FOR THE ADAPTIVE FOLLOW-UP OF PARAMETERS IN MODEL IDENTIFICATION

PAN DE-HUI

(Dongbei Polytechnical College)

HE DE-ZHU

(Beijing Iron and Steel Institute)

ABSTRACT

This paper presents our consideration for theoretical justification of an usual adaptive algorithm. We also present some simpler and effective methods of adaptive follow-up for dynamical modification of model parameters. Finally we offer some examples of practice and calculation for rolling mill productions.