

文章编号: 1000-8152(2000)02-0240-04

极点配置自校正控制及其在冷带轧机厚控系统中的应用

方一鸣 焦晓红 王益群
(燕山大学电气工程学院·秦皇岛, 066004)

摘要: 针对冷带轧机厚控系统被控对象参数在轧制过程中, 尤其在^{TG333}不同道次轧制时的^{TP273.24}时变特性, 本文在常规极点配置自校正控制器设计的基础上, 利用内模原理, 在原自校正控制器中加入积分因子, 设计了厚控系统自校正控制器, 从而有效地消除了系统的静差。实验结果表明, 所设计的自校正控制器确保了系统的控制精度, 明显地提高了产品质量。

关键词: 参数辨识; 极点配置; 自校正控制; 冷带轧机厚度控制

文献标识码: A

Pole Assignment Self-Tuning Control and Its Application in Gauge Control System for Cold-Strip Mill

FANG Yiming, JIAO Xiaohong and WANG Yiqun

(Institute of Electric Engineering, Yanshan University · Qinhuangdao, 066004, P. R. China)

Abstract: In view of the parameters time-varying of the controlled plant of gauge control system for the cold-strip mill in the rolling process, especially in different paths rolling, a kind of self-tuning controller is designed by using the internal model principle to add the integrate factor to the conventional pole assignment self-tuning controller. Thus it can effectively eliminate the steady error of gauge control system. The experimental result shows that the designed self-tuning controller can ensure the accuracy of gauge control system, the quality of products has been improved evidently.

Key words: parameters identification; poles assignment; self-tuning control; gauge control for cold-strip mill

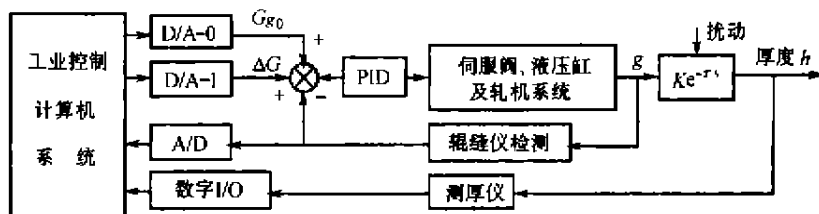
1 引言(Introduction)

极点配置自校正控制算法与传统的控制方法密切相关, 且常具有工程概念明确、鲁棒性强和适用范围广等优点, 因此颇受工程技术人员欢迎, 并已在过程控制中得到了一定的应用^[1]。本文针对冷带轧机厚控系统在轧制过程中、特别是在不同道次的轧制中, 被控对象参数具有一定的时变性的特点, 将参数辨识、自校正控制技术应用于冷带轧机厚控系统中,

以提高控制系统对现场实际的适应能力。西南精密带钢厂现场试验结果表明, 所设计的冷带轧机厚度自校正控制系统具有较好的控制性能。

2 冷带轧机厚控系统的结构框图和被控对象数学模型 (Structure of the gauge control system for cold-strip mill and controlled plant)

冷带轧机厚控系统的主要组成如图1所示:



G_{r0} — 辊缝初始给定值; ΔG — 辊缝修正值。

图1 冷带轧机厚控系统结构方框图

Fig 1 Structure of the gauge control system for cold-strip mill

轧制时辊缝内闭环系统被控对象为^[2]:

$$G_0(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\zeta T_2 s + 1)}, \quad (1)$$

对于某 HCW 650 轧机, $T_1 = 0.25$, $T_2 = 0.033$, $\zeta = 0.38$, 适当整定辊缝内环 PID 控制器的参数, 可得整个厚度环被控对象的传函为:

$$G(s) = \frac{h(s)}{u(s)} = \frac{800 \times K e^{-\tau s}}{s^2 + 40s + 800}, \quad (2)$$

同一轧机, 辊缝内闭环 PID 控制器整定完毕后, 其传函基本不受外界条件的影响; 而在轧制过程中, K 是随着被轧带材的种类、硬度、板宽等因素变化的, 尤其在不同道次轧制过程中, K 值会随着轧制道次的增加而增加. 对于薄带钢轧制, K 约在 0.9~2 之间. 因此, K 是需辨识的. $\tau = L/v$ 为测厚仪检测滞后时间, 其中 L 为测厚仪到轧机中心线的距离, 等于 1.8m, v 为轧制速度, 实验时为 3m/s, 故有 $\tau = 0.6s$.

取采样周期 $T = 0.5\tau$, 则厚度环广义被控对象为:

$$A(z^{-1})h(k) = B(z^{-1})u(k) = z^{-d}B'(z^{-1})u(k), \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}, \quad d = 3, \\ B'(z^{-1}) &= b'_0 + b'_1 z^{-1}, \\ B(z^{-1}) &= b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}, \\ a_1 &= -2e^{-20T} \cos 20T, \quad a_2 = e^{-40T}, \\ b'_0 &= K(1 - e^{-20T}(\cos 20T + \sin 20T)) \neq 0, \\ b'_1 &= K(e^{-40T} + e^{-20T}(\sin 20T - \cos 20T)), \\ b_3 &= b'_0, \quad b_4 = b'_1. \end{aligned} \quad (4)$$

3 厚控系统的参数辨识和极点配置自校正控制器的设计 (Parameters identification and design of the pole assignment self-tuning controller for the gauge control system)

3.1 参数辨识估计^[3] (Parameters identification and estimation)

本系统采用: 在第一道次开始时的低速轧制阶段, 采样辊缝仪和测厚仪实际测得的数据, 利用一次完成最小二乘法辨识得到 K 的初值, 在以后轧制过程中在线辨识 K 值; 并且在以后的每一道次轧制开始时, 以上一道次估计得到的 K 值为基础, 递推估计 (4 次) 得到 K 值. 其参数估计方法如下:

由图 1 可见, 当采样周期 $T = 0.5\tau$ 时, 辊缝和出口厚度间的关系为:

$$h(k) = Kg(k-2), \quad (5)$$

当 K 是估计值 $\hat{K}$ 时, 则输出实际值与估计值之间存在偏差:

$$\varepsilon(k) = h(k) - \hat{K}g(k-2), \quad (6)$$

令

$$J = \sum_{k=2}^N \varepsilon^2(k) = \sum_{k=2}^N [h(k) - \hat{K}g(k-2)]^2, \quad \frac{\partial J}{\partial K} = 0, \quad (7)$$

当采样 N 组数据后, K 的一次完成最小二乘估计值为

$$\hat{K} = \sum_{k=2}^N h(k)g(k-2) / \sum_{k=2}^N g^2(k-2). \quad (8)$$

本系统中采样 8 次辊缝仪和测厚仪的实际值后, 即可计算 K 的初始估计值.

以后轧制过程中采用的渐消记忆递推最小二乘辨识估计算法推导如下:

设

$$\begin{aligned} \Phi_N &= [g(0) \quad g(1) \quad \cdots \quad g(N-2)]^T, \\ Y_N &= [h(2) \quad h(3) \quad \cdots \quad h(N)]^T, \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \hat{K} &= \hat{K}_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T Y_N = \\ &= \sum_{k=2}^N h(k)g(k-2) / \sum_{k=2}^N g^2(k-2). \end{aligned} \quad (9)$$

令

$$P_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} = 1 / \sum_{k=2}^N g^2(k-2),$$

当采样一组新数据后, 对过去的采样数据乘上一个遗忘因子 ρ (ρ 按常规取为 0.9), 即

$$\begin{aligned} \Phi_{N+1} &= [\rho \Phi_N \quad g(N-1)]^T, \\ Y_{N+1} &= [\rho Y_N \quad h(N+1)]^T, \end{aligned}$$

则

$$P_{N+1} = (\Phi_{N+1}^T \Phi_{N+1})^{-1} = \frac{P_N}{\rho^2 + P_N g^2(N-1)}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{K}_{N+1} &= P_{N+1} \Phi_{N+1}^T Y_{N+1} = \\ &= P_{N+1} (\rho^2 \Phi_N^T Y_N + g(N-1)h(N+1)). \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (10) 代入式 (11), 得:

$$\hat{K}_{N+1} = \hat{K}_N + P_{N+1} g(N-1)(h(N+1) - g(N-1)\hat{K}_N). \quad (12)$$

3.2 极点配置自校正控制器的设计 (The design of the pole assignment self-tuning controller)

被控对象的数学模型一般为:

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y(k) &= B(z^{-1})u(k) + \zeta(k) = \\ &= z^{-d}B'(z^{-1})u(k) + \zeta(k), \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n},$$

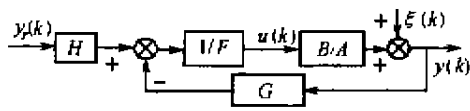
$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_{n_b} z^{-n_b},$$

$$B'(z^{-1}) = b'_0 + b'_1 z^{-1} + \cdots + b'_{n_b} z^{-n_b}, \quad b'_0 \neq 0.$$

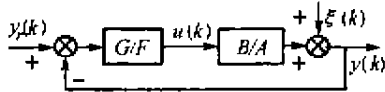
若希望系统的闭环脉冲传函为:

$$W_m(z^{-1}) = B_m(z^{-1})/A_m(z^{-1}), \quad (14)$$

则一般采用图 2 所示的控制方案^[1,4]:



(a) 极点配置的一般控制结构



(b) 误差驱动控制结构

图 2 自校正控制器结构框图

Fig. 2 Structure of the self-tuning controller

图 2(a)中:

$$u(k) = \frac{H(z^{-1})}{F(z^{-1})} y_r(k) - \frac{G(z^{-1})}{F(z^{-1})} y(k), \quad (15)$$

式中: F, G, H 是待设计的多项式. 将式(15)代入式(13)则得:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})H(z^{-1})}{A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1})} y_r(k) + \frac{F(z^{-1})}{A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1})} \zeta(k). \quad (16)$$

极点配置设计的任务就是选择 F, G 和 H , 使闭环系统的脉冲传函等于希望的脉冲传函, 即

$$y(k) = \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} y_r(k) + \frac{F(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \zeta(k) = \frac{B(z^{-1})H(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} y_r(k) + \frac{F(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \zeta(k), \quad (17)$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \cdots + f_{n_f} z^{-n_f},$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \cdots + g_{n_g} z^{-n_g}, \quad (18)$$

其中待定系数 f_i, g_i 可由 Diophantine 方程

$$A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1}) = A_m(z^{-1}) \quad (19)$$

确定, F 和 G 有最小次数解的条件为

$$n_f = n_b - 1, \quad n_g = n_a - 1,$$

即

$$n_f \geq n_b - 1, \quad n_g \geq n_a - 1.$$

$H(z^{-1})$ 是为了保证希望脉冲传函分子多项式, 以及

输出 $y(k)$ 能完全跟踪给定输入 $y_r(k)$.

通常取 $H(z^{-1}) = G(z^{-1})$, 图 2(a) 即简化为图 2(b) 所示的工程上简单实用的输出误差驱动形式^[4].

笔者曾对轧机厚控系统利用上述极点配置方法进行设计, 结果是当图 2(b) 中 $y_r = 1$ 时, 则 y 的稳态值仅为 0.001. 因此, 本文提出了利用内模原理对上述极点配置自校正控制算法进行改进, 改进后的控制器只需将式(18)中的 $F(z^{-1})$ 作简单修改, $G(z^{-1})$ 不变, 即式(18)改为:

$$\begin{cases} F(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \cdots + f_{n_f-1} z^{-(n_f-1)}), \\ G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \cdots + g_{n_g} z^{-n_g}, \end{cases} \quad (20)$$

多项式 F, G 中待定系数 f_i, g_i 仍可由式(19)所示的 Diophantine 方程确定.

本厚控系统中, $n_a = 2, n_b = 4$, 综合考虑系统的动态性能指标, 取希望极点为

$$z_{1,2} = 0.25 \pm j0.25,$$

即

$$A_m(z^{-1}) = 1 - 0.5z^{-1} + 0.125z^{-2}.$$

综上所述, 则计算机实现的极点配置自校正控制算法为:

- 1) 利用一次完成最小二乘法估计得 K 的初值;
- 2) 读取 $h_g(k), h_f(k)$ 和 $g(k)$, 其中 $h_g(k)$ 为当前道次给定的希望出口厚度;
- 3) 用递推估计式(10), (12) 得到 $\hat{K}$, 并代替式(4)中的 K , 求得 a_i, b_i 的估值, 也即得到 $\hat{A}, \hat{B}$;
- 4) 用 $\hat{A}, \hat{B}$ 代替式(19)中的 A 和 B , 并将式(20)代入式(19), 进而求出 F, G 中的系数 f_i, g_i ;
- 5) 由 $u(k) = (h_g(k) - h_f(k))G(z^{-1})/F(z^{-1})$ 对应的差分方程求出控制量 $u(k)$;
- 6) $k = k + 1$, 返回 2), 继续运算.

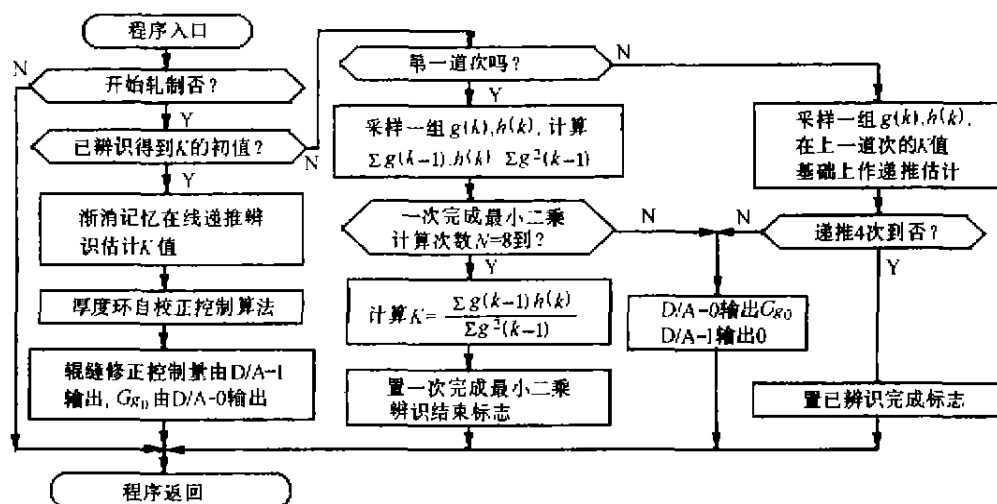
4 计算机仿真(Computer simulation)

在现场应用试验之前, 为了验证极点配置自校正控制器实现的合理性和可行性, 作者在假设被控对象参数不变的情况下, 对极点配置自校正控制系统进行了仿真, 仿真时系统被控对象如式(3)所示, $K = 1.18, T = 0.5\tau = 0.3s$. 仿真结果表明: 极点配置自校正控制系统输出响应性能较好, 且控制量适中, 完全能够达到系统希望的性能要求, 因此, 系统设计是可行的.

5 计算机控制系统的实现 (Realization of the computer control system)

计算机控制系统的实现包括系统硬件和软件两大部分。硬件系统由 PCA-6136, ALL-IN-ONE 386 主板构成的工业控制机和 HY-6040 光电隔离 A/D 板、

HY-6050 光电隔离 D/A 板、HY-6110 光电隔离数字量输入板等组成。软件系统的设计包括实时监控显示主程序和定时中断服务程序等^[5], 辨识和自校正控制算法在定时中断服务程序实现, 其简化框图如图 3 所示。



[注] 辨识完成标志在实时监控主程序中道次切换时清零

图 3 实时参数辨识自校正控制子程序框图

Fig. 3 Subprogram structure of the on-line parameters identification and self-tuning controller

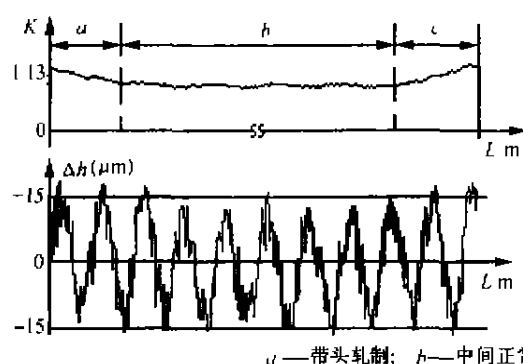
6 现场试验结果 (Test results on spot)

现场试验于 1996 年 2 月在某 HCW 650 四辊轧机上进行, 试验时轧制速度为 3m/s, $\tau = 0.6s$, $T = 0.3s$, 被轧带材为 08AL, 来料宽度 450mm, 来料厚度 0.9mm, 要求成品厚度为 0.35mm, 根据轧制规程的计算, 需轧制 5 个道次即可得到成品, 各道次出口厚度及对应辊缝初始设定值如表 1 所示:

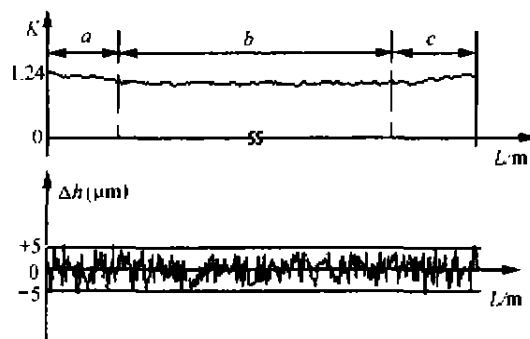
表 1 各道次出口厚度及对应的辊缝初始设计值

Table 1 The exit thickness and the corresponding gap initial setting value in every pass

轧制道次数	1	2	3	4	5
对应出口厚度 h	0.711	0.572	0.474	0.403	0.35
辊缝初始设定值 G_{g0}	0.676	0.533	0.438	0.371	0.321



(a) 第1道次的K值及厚差曲线



(b) 第5道次的K值及厚差曲线

图 4 第1、5道次的K值辨识结果曲线及对应的自校正控制时的轧后厚差曲线

Fig. 4 The identification result curve of K and the gauge difference curve in the pass 1 and 5

图 4 所示为第 1、第 5 道次所得的 K 值辨识结果曲线及对应的自校正控制时的厚差曲线示意图。在第 1 道次至第 5 道次轧制的正常阶段, 辊缝与出口厚度间的放大倍数 K 分别在 1.13、1.16、1.19、

1.12、1.24 左右随机变化。

可见, 采用厚度环在线辨识自校正控制后, 厚度控制精度得到了充分保证。

(下转第 248 页)

果推广到输出反馈情形,是下一步的研究课题.

参考文献(References)

- [1] Kanellakopoulos I, Kokotovic P V and Morse A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1991, AC-36(11):1241-1252
- [2] Krstic M, Kanellakopoulos I and Kokotovic P V. Adaptive control without overparametrization[J]. Systems and Control Letters, 1992, 19(1):177-185
- [3] 陈卫田,王秀红,李继峰.一类具有有界扰动的非线性系统的自适应控制[J].上海交通大学学报,1996,30(1):46-52

本文作者简介

王强德 1971年生,1997年于曲阜师范大学自动化研究所获硕士学位.主要研究方向为非线性系统的鲁棒自适应控制及模糊变结构控制理论与应用.

陈卫田 1967年生,于1996年获上海交通大学博士学位,现任曲阜师范大学自动化研究所教授.主要研究方向为不确定非线性系统的自适应控制与鲁棒控制.

魏春玲 1970年生,曲阜师范大学自动化研究所硕士研究生.主要研究方向为非线性系统的鲁棒自适应控制及模糊控制理论与应用.

初学尊 1939年生,曲阜师范大学自动化研究所所长、教授.发表论文40余篇,其中12篇发表于国内外主要学术刊物,主要研究方向为智能控制与自适应控制.

(上接第243页)

参考文献(References)

- [1] 李清泉.自适应控制系统理论、设计与应用[M].北京:科学出版社,1990,389-400
- [2] 连家创,刘宏民.板形板厚控制[M].北京:兵器工业出版社,1996
- [3] 方一鸣,王洪瑞等.渐消记忆递推辨识实现的木材进锯自校正控制系统[J].控制理论与应用,1994,11(4):464-471
- [4] 古德温 G C,孙贵生著.自适应滤波、预测与控制[M].北京:科学出版社,1992,119-121

- [5] 方一鸣等.STD工控机在可逆冷轧机厚控系统中的应用[J].冶金自动化,1998,22(4):16-18

本文作者简介

方一鸣 1965年生,燕山大学自动化系副教授、系副主任.主要研究领域为自适应控制,变结构控制,计算机控制等.

焦晓红 女,1966年生,燕山大学自动化系副教授.主要从事自适应控制,变结构控制等理论研究工作.

王益群 1938年生,博士生导师,燕山大学校长.主要从事液压伺服系统的智能控制,轧机板厚控制等方面的研究.