

文章编号: 1001-0920(2006)01-0097-03

基于模糊自适应整定PD的活套高度控制系统

李旭, 张殿华, 何立平, 刘相华, 王国栋
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 针对板带热连轧机传统活套高度控制策略存在的问题, 提出用模糊自适应整定PD的控制策略。控制器输入取活套量的偏差 e 和偏差变化率 e_c , 输出取PD控制器3个参数的修正量, 从而实现了PD参数的在线自整定。通过MATLAB语言, 进行了传统PD控制与模糊自适应整定PD控制动态性能的仿真比较, 结果表明采用模糊自适应整定PD控制可明显提高活套高度控制系统的动态性能。

关键词: 热连轧机; 活套高度控制; 模糊自适应整定PD控制; MATLAB

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Looper's Height Control System Based on Fuzzy Self-adaptive PD Control

L I X u, Z H A N G D i a n - h u a, H E L i - p i n g, L I U X i a n g - h u a, W A N G G u o - d o n g

(The State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: L I X u, E-mail: fly2000lixu@163.com)

Abstract: The fuzzy self-adaptive PD control strategy is used to replace the traditional loopers height control method on hot strip tandem mill. The inputs required by the control model are loopers' height error and the error change rate. The model gives the correct additional setpoint for the three parameters of PD control individually. Thus the on-line automatic adjustment of the PD parameters is achieved. The fuzzy adaptive PD control is compared with traditional PD by simulation through MATLAB. The results show that the loopers' height dynamic control performs much better by using the fuzzy adaptive PD control strategy.

Key words: Hot strip tandem mill; Looper's height control; Fuzzy self-adaptive PD control; MATLAB

1 引言

在热带连轧的穿带过程中, 当活套与带钢接触瞬间, 活套高度可能与设定的目标高度相差较大。稳定轧制过程中, 由于轧制条件的变化, 也可能导致活套高度偏离设定值较远。此种情况下, 采用传统的PD控制调节时间长, 超调量大, 影响产品头部的宽度和厚度尺寸精度, 这就是目前国内热轧窄带生产线普遍存在“缩颈”现象的主要原因^[1]。为了提高活套高度控制系统的动态性能, 以及热轧带钢的尺寸精度, 本文提出热轧活套高度控制中采用模糊自适应整定PD的控制策略。

模糊自适应整定PD控制器是一种智能非线性

控制器。它是人们运用模糊数学的基本理论和方法, 把规则的条件和操作用模糊集表示, 并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始PD参数等)作为知识存入计算机知识库中。计算机再根据控制系统的实际响应情况, 运用模糊推理, 即可自动实现对PD参数的最佳调整^[2]。

2 模糊自适应整定PD控制器的设计

活套高度的控制是通过控制上游机架主动动的速度来实现的。以某一设定的活套高度 θ 为基准, 通过调节上游机架主电机速度来维持活套量恒定。传统的活套控制系统中, 由主动速度控制系统及活套机构的套量信号组成活套高度闭环控制系统。

收稿日期: 2004-12-14; 修回日期: 2005-04-07

基金项目: 国家863计划基金项目(2003AA33G010)

作者简介: 李旭(1981—), 男, 山东郓城人, 博士生, 从事板带连轧自动化智能控制的研究; 张殿华(1963—), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士生导师, 从事材料成型过程控制的研究。

上游机架出口和下游机架入口速度差的积分决定了活套量的大小。在轧制过程中,当工艺参数(如辊缝波动、来料温度、其他控制系统的干扰等)发生变化,导致该速度差发生变化时,活套高度偏离基准值,此偏差用来调节上游机架的速度^[3]。

然而当过程干扰或套量偏差过大时,常规的PD控制不能够实时地调整参数,所以很难将控制系统品质指标保持在最佳范围内。本文引入的模糊自适应整定PD控制能够对控制过程中不确定的条件、参数、延迟和干扰等因素进行检测分析;采用模糊推理的方法实现PD参数的在线自适应,不仅保持了PD控制系统原理简单、使用方便、鲁棒性较强等优点,而且具有更大的灵活性、适应性和更好的控制精度,是目前较为先进的一种智能控制系统^[4]。

自适应模糊PD控制器以误差 e 和误差变化 ec 作为输入,以PD三个参数的变化量作为输出,利用模糊控制规则可满足不同时刻的 e 和 ec 对PD参数自整定的要求。

2.1 模糊控制数据库的设计

将活套量的误差 e ,误差变化率 ec 两个输入以及 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 三个输出的论域范围及其模糊子集定义如下: e 和 ec 的论域范围为 $\{-3, 3\}$; ΔK_p 的论域范围为 $\{-0.3, 0.3\}$; ΔK_i 的论域范围为 $\{-0.06, 0.06\}$; ΔK_d 的论域范围为 $\{-3, 3\}$ 。其模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$,子集中元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。设 e, ec 和 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 均服从正态分布。

2.2 模糊控制规则库的设计

本系统模糊控制器采用的是单变量二维形式。一般二维模糊控制器的控制规则可以写成下列条件语句的形式:

$$\text{if } e = A_i \text{ and } ec = B_j \text{ then } u = C_{ij},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

其中, A_i, B_j, C_{ij} 是定义在误差、误差变化率和控制量论域 X, Y, Z 上的模糊集。

表1 ΔK_p 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

本文在总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验基础之上建立了合适的模糊规则表,从而得到针对 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 三个参数分别整定的模糊控制表,如表1~表3所示。

2.3 模糊控制推理算法

模糊自适应PD控制器采用Mamdani模糊推理算法,该推理算法采用取小运算规则定义模糊蕴涵表达的模糊关系,即

$$R_c = A_i \times B_j \times C_{ij} \quad (1)$$

上述的控制规则属于多重二维推理,当模糊关系取 R_c ,合成运算取“ \cdot ”时,有

$$C(z) = \bigcap_{i=1, j=1}^{m, n} \{ (A_i | B_j) \cdot C_{ij}(z) \} \quad (2)$$

令

$$\alpha_j = (A_i | B_j),$$

称 α_j 为匹配度,反映了输入 (A_i) 且 (B_j) 和规则 (A_i) 且 $(B_j) \cdot C_{ij}$ 的匹配程度,所以式(2)变为

$$C(z) = \bigcap_{i=1, j=1}^{m, n} [\alpha_j \cdot C_{ij}(z)] \quad (3)$$

式(3)是采用Mamdani的取小运算定义蕴涵表达的模糊关系而得到的模糊推理算法,它避开求模糊关系而得到一个简捷的算法公式。通过此公式可

得到论域范围内任一输入的控制输出^[5]。根据此合成规则得到的输出仍是一个模糊子集, 需要进行解模糊运算

2.4 模糊量的清晰化

模糊量的清晰化常用方法有最大隶属度法、重心法、左取大和右取大法以及加权平均法。本文在模糊控制器的解模糊过程中采用重心法^[6]。

重心法是指取模糊集隶属度函数曲线同基础变量轴所围面积的重心对应的基础变量值作为清晰化的方法。其计算公式可表示为

$$u^* = \frac{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} u \mu(u) du}{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \mu(u) du} \quad (4)$$

其中 u^* 为清晰化输出量, u 为输出变量, μ 为模糊集隶属函数, m_{\min} 为清晰化值的下限, m_{\max} 为清晰化值的上限

3 基于模糊自适应整定 PD 的活套高度控制系统

模糊自适应整定 PD 的活套高度控制系统框图如图 1 所示

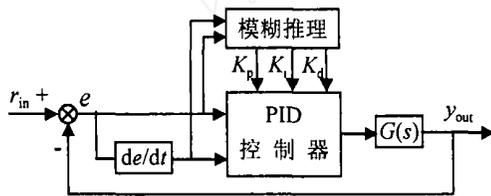


图 1 模糊自适应整定 PD 活套高度控制系统

图 1 中 r_{in} 代表活套套量设定值, e 代表系统误差, de/dt 代表系统误差的变化率, K_p, K_i, K_d 为经过模糊推理并计算得出的 PD 控制器参数, $G(s)$ 为被控对象, y_{out} 为活套套量实际值

为了便于研究, 可认为活套高度控制系统为一阶惯性环节和积分环节相串联^[7]。结合某热轧厂活套高度控制系统的实际参数, 推导出被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.5}{0.048s \times (0.05s + 1)} \quad (5)$$

4 仿真实验及结果分析

本文利用 MATLAB 语言, 以某热连轧厂实际的活套高度控制系统为对象进行了模糊自适应整定 PD 控制系统的仿真。利用 Fuzzy Logic Toolbox 工具箱设计了模糊控制器, 采用阶跃信号对活套高度控制系统进行了常规 PD 控制和模糊自适应整定 PD 控制的仿真实验比较

PD 参数初始值为: $K_{p0} = 0.4, K_{i0} = 0.01, K_{d0} = 1.0$ 。采样时间为 1 ms, 在第 1500 个采样时间点

控制器输出加一幅值为 $\delta = 2.0$ 的干扰。仿真结果如图 2 所示

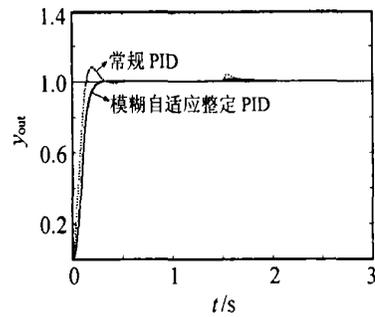


图 2 活套高度控制系统阶跃响应曲线

由图 2 可以看出, 模糊自适应整定 PD 控制在牺牲上升时间的前提下, 调整时间比常规 PD 控制要短, 而且几乎不具有超调量。同时模糊自适应整定 PD 控制消除了系统稳态误差, 改善了单纯模糊控制的静态性能。另外, 在同一采样时刻加同样大小的干扰信号时, 引入模糊自适应整定 PD 控制后系统输出的最大动态偏差小于常规 PD 控制, 系统的抗干扰能力也有所增强。所以模糊自适应 PD 控制具有比常规 PD 控制更好的动静态性能

5 结 论

本文将模糊控制、自适应控制和常规 PD 控制的思想融合起来, 设计了一个基于模糊自适应整定 PD 的活套高度控制器。通过仿真实验表明, 该控制器不仅能够改善常规 PD 控制, 单独模糊控制器的控制效果, 而且具有更大的灵活性、适应性, 更强的实时性以及更好的控制精度

参考文献 (References)

- [1] 张殿华. 热带钢连轧过程中活套高度和张力的智能控制 [D]. 沈阳: 东北大学, 2003: 20-50
(Zhang D H. *The Hot Tandem Rolling Mill Looper Height and Tension Intelligent Control* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003: 20-50)
- [2] 刘金琨. 先进 PD 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 63-86
(Liu J K. *Advanced PID Control and MATLAB Simulation* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 63-86)
- [3] 张殿华, 王君, 郑芳, 等. 板带热连轧机组活套高度模糊控制 [J]. 东北大学学报, 2000, 21(2): 203-206
(Zhang D H, Wang J, Zheng F, et al. Fuzzy Logic Control for the Loopers Height on Hot Strip Tandem Mill [J]. *J of Northeastern University*, 2000, 21(2): 203-206)

(下转第 103 页)

采用本文给出的算法所得到的最优控制序列为 153 6, 153 7, 153 8, 153 8, 153 5, 152 8; 最优消费轨道序列为 456 1, 460 8, 465 6, 470 4, 475 3, 480 2, 485 3; 最优投资轨道序列为 122 8, 120 0, 118 3, 117 4, 117 2, 117 6, 118 4; 性能指标函数取值为 $J = 338.7$

文献[2]采用的最优跟踪算法没有利用期望轨道信息的未来全部信息, 仅利用了期望轨道信息的未来一步信息, 且没有利用理想控制策略信息; 文献[3~5]的算法利用了期望轨道信息的未来全部信息, 但也没利用理想控制策略信息; 本文算法利用了系统提供的全部信息。从上述比较可以看出, 在求最优控制策略时, 所利用的信息越多, 性能指标函数取值越低, 控制策略越好。因此, 文献[2]采用的算法性能指标值最高, [3~5]的算法性能指标值次之, 本文算法性能指标值最低

5 结 语

本文研究了含理想控制策略和期望轨道的二次型最优控制问题。通过把二次性能指标等效为关于控制的观测信息, 从信息融合估计的角度, 使原问题转化为求控制量的“最优估计”问题。通过一个宏观经济系统控制的例子, 计算结果表明, 本文算法所得二次性能指标值低于现有算法, 现有算法不能实现式(7)所示的性能指标意义下的最优

参考文献(References)

- [1] Pindyck R S. Optimal Economic Stabilization Policies under Decentralized Control and Conflicting Objectives [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1977, 22(4): 517-529.
- [2] 王翼. 经济系统的分析预测与控制[M]. 北京: 中国城市出版社, 2001: 191-194.
(Wang Y. *Analysis, Prediction and Control of Economic System* [M]. Beijing: Chinese Municipality Press, 2001: 191-194.)
- [3] 于欣, 廖福成, 史明坤. 利用虚拟目标值的预见控制设计[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1998, 6(3): 319-326.
(Yu X, Liao F C, Shi M K. Preview Control with Imaginary Input [J]. *J of Basic Science and Engineering*, 1998, 6(3): 319-326.)
- [4] 谭跃刚, 刘峰, 周祖德. 基于协调误差的目标轨迹预见跟踪控制的研究[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(15): 1265-1268.
(Tan Y G, Liu F, Zhou Z D. Study Preview Tracking Control of Object Trajectory Based on Harmony Error [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2003, 14(15): 1265-1268.)
- [5] Halpern M E. Preview Tracking for Discrete-time SISO Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(3): 589-592.
- [6] 周军, 王志胜, 周凤岐. 基于线性均方估计的数据融合理论[J]. *宇航学报*, 2003, 24(4): 364-367.
(Zhou J, Wang Z S, Zhou F Q. Data Fusion Theory Based on Linear Least Square [J]. *J of Astronautics*, 2003, 24(4): 364-367.)
- [7] 王志胜. 信息融合控制理论和方法[R]. 南京: 南京航空航天大学, 2004: 43-44.
(Wang Z S. *Information Fusion Control Theory and Method* [R]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004: 43-44.)
- [1] Pindyck R S. Optimal Economic Stabilization Policies under Decentralized Control and Conflicting Objectives [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1977, 22(4): 1839-1848.
(Liu H J, Han P, Wang D F, et al. Fuzzy PD Control with Grey Prediction and Its Application in Temperature Control System [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(8): 1839-1848.)
- [4] 刘红军, 韩璞, 王东风, 等. 灰色预测模糊PD控制在气温控制系统中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(8): 1839-1848.
(Liu H J, Han P, Wang D F, et al. Fuzzy PD Control with Grey Prediction and Its Application in Temperature Control System [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(8): 1839-1848.)
- [5] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 45-57.
(Sun Z Q, Zhang Z X, Deng Z D. *Intelligent Control Theory and Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 45-57.)
- [6] 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999: 194-199.
(Yi J K, Hong Y B. *Intelligent Control Technology* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1999: 194-199.)
- [7] Kenya Fukushima. Looper Optimal Multivariable Control for Hot Strip Finishing Mill [J]. *Trans on ISIJ*, 1988, 28(2): 463-469.

(上接第99页)

- [4] 刘红军, 韩璞, 王东风, 等. 灰色预测模糊PD控制在气温控制系统中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(8): 1839-1848.
(Liu H J, Han P, Wang D F, et al. Fuzzy PD Control with Grey Prediction and Its Application in Temperature Control System [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(8): 1839-1848.)
- [5] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 45-57.
(Sun Z Q, Zhang Z X, Deng Z D. *Intelligent Control Theory and Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 45-57.)
- [6] 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999: 194-199.
(Yi J K, Hong Y B. *Intelligent Control Technology* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1999: 194-199.)
- [7] Kenya Fukushima. Looper Optimal Multivariable Control for Hot Strip Finishing Mill [J]. *Trans on ISIJ*, 1988, 28(2): 463-469.