

文章编号: 1001-0920(2007)04-0399-04

基于模糊自适应 PID 的铸轧机结晶器液位控制系统

曹光明, 吴迪, 张殿华

(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: 结晶器内钢水液位控制系统是一个时变的、非线性的、多干扰的复杂系统,通过对铸轧机结晶器液位控制系统的分析,建立包含液压执行机构在内的结晶器液位模型,并且提出模糊自适应 PID 控制策略,给出模糊控制规则,从而实现 PID 参数的在线整定. 仿真表明该系统较常规 PID 控制具有更好的稳定性,且控制精度高.

关键词: 双辊铸轧; 液位控制模型; 传统 PID 控制; 模糊自适应 PID 控制; 模糊控制规则

中图分类号: TP13 文献标识码: A

Design of mold liquid level control system in roll caster based on fuzzy control regulation

CAO Guang-ming, WU Di, ZHANG Dian-hua

(The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China.

Correspondent: CAO Guang-ming, E-mail: cgm415@163.com)

Abstract: As a time-variant, non-linear and multi-disturbance complex system, the controlling system of steel level is analysed, according to which the model of steel level including the hydraulic actuator is constructed. Furthermore, the fuzzy self-adaptive PID control strategy is presented and the rule of fuzzy control is proposed in order to realize the in-line adjustment of PID parameters. The simulation result shows that the proposed system is more stable and accurate than the traditional PID control.

Key words: Twin-roll strip casting; Steel level controlling model; Traditional PID control; Fuzzy self-adaptive PID control; Regulations of the fuzzy control

1 引言

双辊铸轧薄带是以转动的轧辊为结晶器,用液态金属直接生产薄带的新技术^[1]. 熔池钢水液位系统采用液压伺服机构作为执行机构,在熔池钢水液位发生变化时,通过该执行机构来调整塞棒水口开度,从而使熔池钢水液位稳定在设定值. 熔池钢水液位的控制是双辊铸轧薄带钢过程控制的核心环节之一. 国外文献报道,钢水液位应控制在 ± 2 mm 才能铸轧出高质量的薄带. 采用传统的 PID 控制调节时间长,超调量大. 而传统的模糊 PID 双模控制采用开关式硬切换,容易造成系统的抖动,严重影响铸轧过程的稳定性.

本文在建立包含液压执行机构在内的结晶器液位模型的基础上,提出采用模糊自适应 PID 的控制策略. 把规则的条件、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 PID

参数等)作为知识存入计算机知识库中;然后计算机根据控制系统的实际响应情况(即专家系统的输入条件),运用模糊推理,即可自动实现对 PID 参数的最佳调整.

2 液压系统建模

2.1 电液伺服阀模型

液压伺服阀的传递函数可按如下二阶振荡环节表示^[2-5]:

$$\frac{Q_f(s)}{I(s)} = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_n}s + 1} \quad (1)$$

式中: K_{sv} 为电液伺服阀增益, ω_n 为电液伺服阀固有频率, ζ_{sv} 为电液伺服阀的阻尼比, Q_f 为电液伺服阀流量, I 为伺服阀电流.

2.2 液压缸模型

负载压力和阀芯位移较小时压力-流量曲线接

收稿日期: 2006-03-08; 修回日期: 2006-08-10.

基金项目: 国家 973 计划项目(2004CB619108).

作者简介: 曹光明(1982—),男,四川绵阳人,博士生,从事铸轧控制系统的研究;吴迪(1952—),男,辽宁绥中人,教授,博士生导师,从事型钢轧制理论与工艺研究.

近直线,所以一般仿真时忽略活塞上的压强和泄漏面积的影响,压力-流量特性可线性化为

$$Q_f = K_q X_v - K_p p_f. \quad (2)$$

式中: K_q 为伺服阀流量增益, K_p 为压力-流量系数, X_v 为阀芯位置.

因为对熔池钢水液位要求高精度控制,对执行机构的要求较高,所以液位控制系统的液压伺服机构采用对称式液压缸. 对称式液压缸活塞位移 X_t , 负载流量 Q_f , 负载 F_l 之间的关系可用如下方程组描述:

负载流量方程为

$$Q_f = A_t \frac{dX_t}{dt} + \frac{V_t}{4E_y} \frac{dp_t}{dt} + C_{st} p_f; \quad (3)$$

活塞运动方程为

$$A_t p_f = m_t \frac{d^2 X_t}{dt^2} + B_t \frac{dX_t}{dt} + k_t X_t + f_\mu + F_l. \quad (4)$$

式中: A_t 为液压缸活塞面积, k_t 为负载的弹性刚度, f_μ 为摩擦力.

液压缸的传递函数可由上述 3 个基本方程直接联立求得,实际应用时只考虑主要因素的影响,有些次要因素可以忽略. 当无弹簧负载且只考虑主输入信号 x_v (忽略干扰力 F_l 的影响) 时,传递函数为

$$\frac{X_t}{X_v} = \frac{K_q}{s \left(\frac{s^2}{h} + \frac{2}{h} s + 1 \right)}. \quad (5)$$

式中: $h = \sqrt{\frac{4E_y A_t^2}{m_t V_t}}$ 为液压系统固有频率; $n =$

$\frac{K_q}{A_t} \sqrt{\frac{E_y m_t}{V_t}} + \frac{B_t}{4A_t} \sqrt{\frac{V_t}{E_y m_t}}$ 为液压阻尼比, V_t 为液压缸总体积 (包括管路); E_y 为体积弹性模量; C_{st} 为液压缸的总泄漏系数; m_t 为活塞和负载折合到活塞上的总质量; B_t 为活塞和负载折合到活塞上的总阻尼系数; 无量纲量 K_q 为线性化后的伺服阀压力-流量系数 K_p 与液压缸泄漏系数 C_{st} 之和. 式(5)就是描述液压机构的典型二阶模型.

3 塞棒流量模型

3.1 静态流量特性

仿照调节阀的工作流量模型建立塞棒的模型^[6,7],再根据塞棒的工作流量模型可得塞棒节流口的流量增益

$$k_Q = \frac{dQ_n}{dX_t} = \frac{C_{kq}}{X_{\max}} \frac{Z \left(\frac{X_t}{X_{\max}} - 1 \right)}{\ln Z} \times \left\{ \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{S_{\max}} - 1 \right) \left[Z^2 \left(\frac{X_t}{X_{\max}} - 1 \right) + 1 \right] \right]^{3/2}} \right\} \sqrt{g h}. \quad (6)$$

式中: C_{kq} 为塞棒节流口的额定流量系数; g 为重力加速度; h 为中间包钢水液位到熔池钢水液位的相对高度; X_{\max} 为塞棒的最大行程,即塞棒水口的最大开度; S_{\max} 为塞棒全开时塞棒节流口处的压降与系统总压降之比.

3.2 动态流量特性

塞棒位置到熔池钢水流入量之间的动态特性主要为延迟特性,由浸入式水口的流量传输引起. 本文采用惯性环节来代替,即

$$Q_{in}(s) = \frac{k_Q}{1 + \tau s} X_t(s) + X_d(s). \quad (7)$$

式中: X_d 为干扰量; τ 为时间常数,一般为 0.4 ~ 0.9 s.

3.3 双辊结晶器熔池液位模型

单位时间内双辊结晶器钢水流入量为 Q_n , 由物流平衡原理可得

$$(Q_n - L \cdot D \cdot v) \cdot t = L \cdot S, \quad (8)$$

$$S = (2R + D) H - \sqrt{R^2 - H^2} H -$$

$$R^2 \arcsin \frac{H}{R}. \quad (9)$$

式中: H 为熔池钢水液面高度, R 为轧辊半径, L 为铸轧辊辊面宽度, D 为薄带厚度, v 为铸轧速度. 由式(8), (9) 可得熔池钢水液位模型为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_n - L \cdot D \cdot v}{L(2R + D) - 2L \sqrt{R^2 - H^2}}. \quad (10)$$

综上所述,建立了熔池钢水液位被控对象的模型,该模型包括液压执行机构、塞棒水口流量特性和熔池钢水液面高度 3 个部分. 输入是驱动电液伺服阀的电流信号 I , 输出是中间包流入双辊结晶器的钢水流量 Q_n . 由钢水流入量 Q_n 和铸轧速度 v , 通过式(10) 可求出熔池钢水液面高度 H . 很明显此模型具有很强的非线性.

4 模糊自适应 PID 控制器设计

熔池钢水液位系统采用液压伺服机构作为执行机构,在熔池钢水液位发生变化时,通过该执行机构来调整塞棒水口开度,从而使熔池钢水液位稳定在设定值^[8-10].

由于钢水液位控制系统是一个时变的、非线性的、多干扰的复杂系统,常规 PID 控制不能够实时地调整参数,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 PID 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 PID 参数的在线自整定,不仅保持了 PID 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. 本文所采取的模糊自适

应 PID 控制器设计系统框图如图 1 所示. 由图可见, 模糊控制器的输入量为系统的偏差和偏差变化率, 经过模糊化处理分别得到模糊量 E 和 EC , 以此为依据进行模糊推理, 输出变量为 PID 控制参数 K_p, K_i, K_d 的增量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$, 分别加上 PID 控制参数的初始值, 即得到实际的 PID 控制参数.

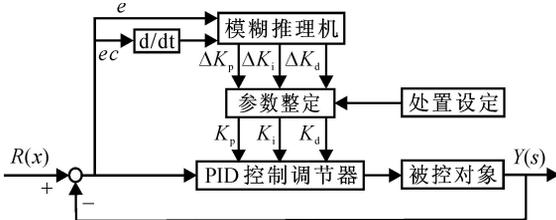


图 1 PID 参数自适应模糊控制器系统框图

4.1 模糊控制器输入、输出

模糊控制器选用二维输入和三维输出, 其模糊语言变量集合均划分为“负大 (NL)”、“负中 (NM)”、“负小 (NS)”、“零 (ZO)”、“正小 (PS)”、“正中 (PM)”、“正大 (PL)”等模糊子集. 其中: e 和 ec 的离散论域均取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 控制输出的离散论域设定为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$.

在实验室铸轧试验中, 液位高度的可变化范围为 $[0, 255]$ mm, 实际试验时的变化范围为 $[0, 180]$ mm, 设定的液位高度为 160 mm. 所以液位高度偏差的实际物理变化范围为 $[-160, 20]$ mm, 液位高度的偏差变化率为 $[-200, 200]$ mm/s. 实际操作控制量为 3 个 PID 参数的增量 K_p, K_i, K_d , 它们的实际调整范围分别为: $[-4, 4], [-0.03, 0.03], [-4, 4]$.

由于实际的输入偏差 e 物理变化范围在零值左右, 并不是对称的, 将它们变换到相应的论域时, 采用斜率不同的分阶段线性变换方式, 即不同的阶段用不同的量化因子 k .

本文模糊变量隶属函数采用三角形函数形式和 S 形函数形式相结合.

4.2 模糊控制器规则

在本系统控制器中, 采用的是单变量二维形式, 本系统模糊控制器的输入量为偏差 e 和偏差变化率 ec , 通过转换将其变为模糊偏差 E 和模糊偏差变化率 EC , 输出量为 PID 参数的增量 K_p, K_i, K_d , 其模糊控制器的控制规则可以写成下列条件语句的形式:

if $E = A_m$ and $EC = B_n$,
 then $K_p = C_{mn}, K_i = D_{mn}, K_d = F_{mn}$,
 $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$.

其中: $A_m, B_n, C_{mn}, D_{mn}, F_{mn}$ 分别是定义在误差、误差

变化率和 PID 参数的增量 K_p, K_i, K_d 论域上的模糊集.

本文在多方咨询模糊控制专家和操作人员的基础上, 初步建立了熔池钢水液位高度控制的控制规则, 在模拟控制仿真的基础上, 调整、确定了根据液位偏差 e 和偏差变化率 ec 值的不同 PID 的参数整定原则, 并整理成模糊控制表如表 1 ~ 表 3 所示.

表 1 K_p 的模糊规则表

EC	E						
	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 K_i 的模糊规则表

EC	E						
	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 K_d 的模糊规则表

EC	E						
	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						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

1) 在偏差较大时, 为了尽快地消除偏差影响, 提高响应速度, K_p 取值较大, K_i 取较小值; 在偏差较小时, 为了继续消除偏差影响, 并且防止超调现象过大, 产生振荡, K_p 取值要相应减小, K_i 取值较小; 在偏差很小时, 为了消除静态误差, 克服超调现象, 使得系统尽快稳定, K_p 取值要继续减小, K_i 取值不变或者稍微取大些.

2) 偏差变化 ec 的大小表明偏差变化的速率, ec 越大时, K_p 取值越小, K_i 取值越大; 反之, ec 越小时, K_p 取值越大, K_i 取值越小.

3) 微分作用类似于预见性, 它阻止偏差的变化, 有助于减小超调, 克服振荡, 使系统趋于稳定, 加快系统的动作速度, 减小调整时间, 改善系统的动态性能. 因此, 在偏差较大时, K_d 取小值.

4.3 模糊推理机制

本文采用 Mamdani 提出的推理法来解决这个问题,即用一个由 X 到 Y 的模糊关系 R 来表示模糊条件语句,具体如下:

If A and B then C .

这种模糊条件语句决定了双输入单输出的模糊控制器结构. 设 $A(x) = (a_1, \dots, a_n)^T$ 为 n 维模糊列向量, $B(y) = (b_1, \dots, b_m)$ 为 m 维模糊行向量, $C(z) = (c_1, \dots, c_t)$ 为 t 维模糊行向量, 则模糊条件语句所决定的模糊关系 R 是一个三元关系, 可写成直积形式, 即

$$R = A \times B \times C, \quad (11)$$

具体计算公式如下:

$$R = (A \times B)^T \circ C. \quad (12)$$

式中 $(A \times B)^T$ 的含义是: $A \times B$ 是模糊向量的笛卡尔积, 计算结果是 $n \times m$ 模糊阵, 而 $(A \times B)^T$ 表示把这个 $n \times m$ 模糊阵按行“拉直”成 nm 维模糊行向量, 再转置成 nm 维模糊列向量, 因而 R 最终计算结果为 $nm \times t$ 的模糊阵. 对于给定的模糊集 $A_1(x)$ 和 $B_1(y)$, 用扎德的近似推理规则, 可按下述公式求出推理结果 $C_1(z)$:

$$C_1(z) = [A_1(x) \times B_1(y)]^T \circ R. \quad (13)$$

其中 $[A_1(x) \times B_1(y)]^T$ 的含义是把 $[A_1(x) \times B_1(y)]$ 这个 $n \times m$ 模糊阵按行“拉直”成 nm 维模糊行向量. $C_1(z)$ 最后计算结果为 t 维模糊行向量.

如果有 n 组模糊条件语句, 则 R 应为每条语句所得的模糊关系矩阵 R_i 的并, 即

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i, \quad (14)$$

其中 $R_i = (A_i \times B_i)^T \circ C_i$.

4.4 解模糊策略

本模糊控制器采用重心法对输出模糊子集解模糊. 以控制作用论域上的点 $u \in U$ 对控制作用模糊集的隶属度 $U(u)$ 为权系数进行加权平均而求得解模糊结果. 对于离散论域情况, 设 $U = \{u_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 有

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n U(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^n U(u_i)}. \quad (15)$$

5 仿真实验及结果分析

控制模型的仿真参数如表4所示, 本文用 Matlab 语言中的模糊控制箱对模糊自适应 PID 控制系统进行仿真, 其仿真结构框图如图2所示. 分析其时间响应特性, 并且比较常规 PID 控制器与本文所设计的模糊自适应 PID 控制器的动静态性能.

模糊自适应 PID 控制中 PID 参数 K_p , K_i , K_d 的初始值为:

表4 模型参数表

参数	实际值	参数	实际值	参数	实际值
k_{sv}	0.025	w_{sv}	0.01	sv	0.7
E_y	5e8	A_t	8.76e-4	B_t	2.6
m_t	25	K_p	4.7e-13	V_t	7.5e-3
C_{st}	4.7e-13	k_Q	0.000 1	D	0.02
	0.9				

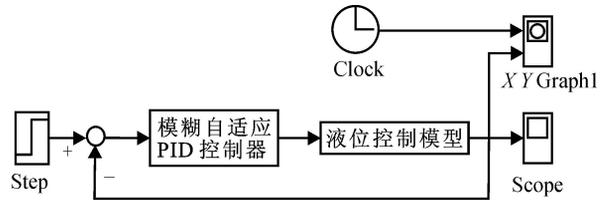


图2 使用模糊自适应PID控制器结晶器液位高度控制系统仿真结构框图

7.6, 0.02, 7. 液位高度基准信号的基准值为 160 的阶跃信号, 仿真时间为 30 s.

如图3所示, 常规 PID 系统的超调量为 10%, 调节时间为 5 s; 而模糊控制器在不牺牲上升时间的前提下, 系统的超调量几乎为 0, 调节时间为 3 s. 毫无疑问, 所设计的熔池液位模糊自适应 PID 控制器与常规的 PID 线性控制器相比, 系统的动态性能得以明显提高.

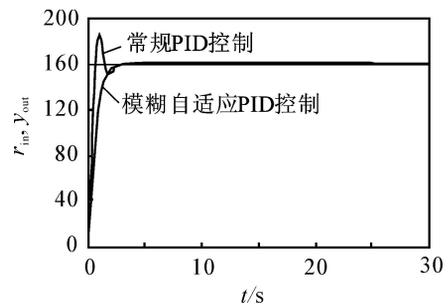


图3 液位高度响应曲线

6 结 语

1) 分析熔池钢水液位控制系统的组成和原理, 建立了液压伺服系统、中间包塞棒水口和双辊结晶器液位的控制模型.

2) 针对双辊铸轧工艺的要求, 给出一种适用于熔池液位控制用模糊自适应 PID 控制器的设计方法. 针对实验室铸轧机熔池液位控制系统, 确定了液位高度模糊控制器的结构和相关参数, 采用 Mamdani 模糊推理算法, 并最终完成了熔池液位高度模糊自适应 PID 控制器的设计.

3) 用 Matlab 语言中的 Simulink 仿真工具对熔池液位高度模糊自适应 PID 控制系统进行仿真研究^[11], 仿真结果表明: 与常规 PID 调节器相比, 使用模糊控制器可以使熔池液位高度控制具有更好的动态性能. (下转第 407 页)

参考文献(References)

- [1] Bergen A R, Hill D J. A structure preserving model for power system stability analysis [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1981, 100: 25-35.
- [2] Vaithianathan Venkatasubramanian, Heinz Schattler, John Zarorszky. Dynamics of large constrained nonlinear systems — A taxonomy theory[J]. Proc of the IEEE, 1995, 83(11): 1530-1561.
- [3] Denis Lee Hau Aik, Goran Andersson. Nonlinear dynamics in HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1417-1425.
- [4] Harris McClamloch, Danwei Wang. Feedback stabilization and tracking of constrained robots [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(5): 419-426.
- [5] Krishnan H, McClamloch N H. Tracking in nonlinear differential algebraic control systems with application to constraint robot systems [J]. Automatica, 1994, 30(12): 1885-1897.
- [6] Kumar A, Daoutidis P. Feedback control of nonlinear differential algebraic equation systems [J]. AIChEJ, 1995, 41(4): 619-636.
- [7] Ortega R, Van der Schaft A J, Maschke B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems [J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [8] Cheng D, Xi Z, Hong Y, et al. Energy-based stabilization in power systems [C]. Proc of the 14th IFAC World Congress. Beijing, 1999: 297-303.
- [9] Wang Y, Cheng D, Hong Y. Stabilization of synchronous generators with Hamiltonian function approach[J]. Int J of Systems Science, 2001, 32(8): 971-978.
- [10] Xi Z, Cheng D, Lu Q, et al. Nonlinear decentralized controller design for multimachine power systems using Hamiltonian function method[J]. Automatica, 2002, 38(3): 527-534.
- [11] Sun Y, Shen T, Ortega R, et al. Decentralized controller design for multi-machine power systems on Hamiltonian structure[C]. Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 3045-3050.
- [12] Wang Y Z, Cheng D Z, Liu Y H, et al. Adaptive H excitation control of multimachine power systems via the Hamiltonian function method[J]. Int J of Control, 2004, 77(4): 336-350.
- [13] Wang H S, Yung C F, Chang F R. H control for nonlinear descriptor systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(11): 1919-1925.

(上接第 402 页)

参考文献(References)

- [1] Kuster T. Advances in strip-casting carbon and stainless [J]. New Steel, 1996, 7(11): 68-76.
- [2] 刘青荣, 宋锦春, 张志伟. 液压传动[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
(Liu Q R, Song J C, Zhang Z W. Hydraulic transmission[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999).
- [3] 刘长年. 液压伺服系统优化设计理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
(Liu C N. The theory of hydraulic servo system optimum design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.)
- [4] 王春行. 液压伺服控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
(Wang C X. Hydraulic servo control system [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.)
- [5] 臧怀泉, 发黄镇海, 尹汝波. 液压伺服系统建模的新方法[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 53-55.
(Zang H Q, Huang Z H, Yin R P. A new method for modeling the hydraulic servo system [J]. Computer Simulation, 2002, 19(5): 53-55.)
- [6] 王伟, 郭戈, 柴天佑. 连铸过程的建模与控制[J]. 控制与决策, 1997, 12(增刊): 1-6.
(Wang W, Guo G, Chai T Y. Modeling and control of continuous casting process [J]. Control and Decision, 1997, 12(S): 1-6.)
- [7] Michel D, Sylvie G, Laurent P F. Application of fuzzy logic control for continuous casting mold level control [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1998, 6(2): 246-256.
- [8] 郭戈, 王伟, 柴天佑, 等. 连铸过程自动化技术综述[J]. 冶金自动化, 1998, 26(2): 1-4.
(Guo G, Wang W, Cai T Y, et al. On automation technologies in continuous casting process [J]. Metallurgical Industry Automation, 1998, 26(2): 1-4.)
- [9] 王国栋, 刘相华. 金属轧制过程人工智能优化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
(Wang G D, Liu X H. Intelligent optimization in metal rolling [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.)
- [10] 张殿华. 热带钢连轧活套和张力的智能控制[D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
(Zhang D H. Looper and tension intelligent control for a hot strip mill [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003.)
- [11] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Xue D Y, Chen Y Q. System simulink technique and application based on Matlab/Simulink [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)