

基于粒子群优化的多弧离子镀膜 温度控制模糊系统

胡志超, 凌云

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 分析了多弧离子镀膜层沉积过程的特点, 提出一种基于粒子群优化的PID插值自适应控制与模糊控制相结合的自适应控制算法, 并用MATLAB仿真软件对控制算法进行仿真。结果表明, 该控制方案简单、有效, 能满足多弧离子镀膜温度控制要求。

关键词: 多弧离子镀膜; 粒子群优化; 模糊控制

中图分类号: TP273+.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)05-0074-06

The Multi-Arc Ion Plating Temperature Control Fuzzy System Based on the Particle Swarm Optimization

Hu Zhichao, Ling Yun

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Analyzes the characteristics of multi-arc ion plating layer deposition process and proposes a new fuzzy adaptive control arithmetic based on the combination of particle swarm optimized PID interpolation adaptive control and fuzzy control. The MATLAB simulation shows that the control scheme is simple, effective and meets the requirements of multi-arc ion plating temperature control.

Keywords: multi-arc ion plating; particle swarm optimization; fuzzy control

0 引言

多弧离子镀TiN薄膜的组织结构、力学性能受多种参数的影响, 这些参数包括: 基体温度、基体偏压、靶电流、离子轰击、氮气分压等。基体温度对镀层的生成及膜的性能产生直接影响。基体温度适中有利于膜的生成, 能增大膜的沉积速率, 也有利于提高膜层与基板的附着力, 并使膜层晶粒长大, 表面平整光亮; 温度太低, 膜的形核不均匀, 为疏松、粗大的锥状晶组织, 膜硬度、结合力、耐磨性等力学性能较差; 温度太高, 基体过热软化, 膜的形核为疏松的柱状晶, 膜的性能较差。因此, 在整

个膜层的沉积过程中, 要严格控制基体温度^[1]。在真空环境下, 真空室主要以辐射方式传热, 时滞常数在低温和高温时相差较大, 仅用一组PID参数达不到理想温控品质。为此, 本文提出一种基于粒子群优化的PID-模糊复合自适应控制算法, 当温差较大时模糊控制起主要作用。MATLAB仿真结果表明, 此方案控制效果较好, 能达到控制要求。

1 数学模型

温度控制系统的控制对象为真空室, 真空室的温度具有非线性、大惯性和纯滞后等动态特性。为

收稿日期: 2011-07-10

作者简介: 胡志超(1986-), 男, 浙江衢州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂过程建模集成优化控制,

E-mail: hzc104@163.com

计算方便,在控制过程中,通常把真空室温度的动态特性看成一个线性系统,用一个惯性环节串联一个纯滞后环节表示为^[2-3]

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

式中: K 为比例系数;

T 为对象的惯性时间常数;

τ 为纯滞后时间。

对于不同的控制对象,参数 K, T, τ 的取值不同。

在真空室中,热交换主要以辐射方式进行,因此纯滞后时间 τ 在低温区和高温区不同,且变化较大,变化呈明显非线性特性。这是真空室温度难以控制的主要原因。

由飞升曲线法得到某一多弧离子镀膜设备真空室的一阶惯性加纯滞后 (first order plus deat time, FOPDT) 模型为

$$G(s) = \frac{10}{1300s+1} e^{-\tau s}, \quad (2)$$

由实验测得纯滞后时间 τ 与真空室温度 θ 的关系如表 1 所示。

表1 纯滞后时间 τ 与温度 θ 的关系

Table 1 The relationship between time-delay τ and temperature θ

$\theta / ^\circ\text{C}$	20	100	150	200	300	400	500	600
τ	238	230	221	211	175	125	82	48

根据表 1 的数据,利用 MATLAB 软件中的最小二乘拟合函数 ployfit, 拟合出 τ 与 θ 的关系为

$$\tau = 1.329\ 627 \times 10^{-6} \theta^3 - 0.001\ 531 \theta^2 + 0.128\ 204 \theta + 234.125\ 080, \quad (3)$$

拟合结果如图 1 所示。

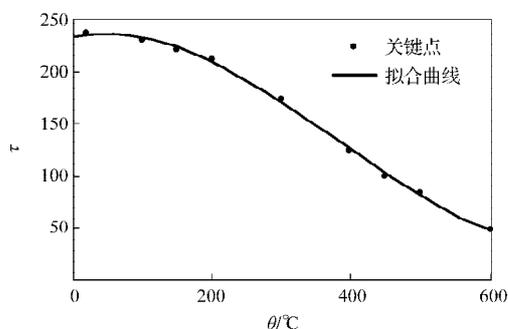


图1 纯滞后时间-温度拟合曲线

Fig. 1 The fitting curve for the time delay vs temperature

由表 1 和图 1 可知,纯滞后时间 τ 与室温 θ 之间呈明显的非线性关系, τ 随 θ 的增大而减小,且变化范围较大。

2 PID 参数整定

Ziegler-Nichols 方法 (简称 Z-N 法) 是一种基于稳定性分析的 PID 整定方法。在整定 PID 参数时,控制对象工作在临界状态,若被控对象的传递函数可近似为式 (1) 所示的带延迟的一阶系统,则适合此法。Z-N 法的整定公式为:

$$\text{比例系数 } K_p = 1.2 \frac{T}{K\tau};$$

$$\text{积分时间常数 } T_i = 2\tau;$$

$$\text{微分时间常数 } T_d = 0.5\tau;$$

$$\text{控制器输出 } U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s).$$

由 Z-N 整定法则可知, PID 参数 K_p, T_i, T_d 与系统的纯滞后时间 τ 呈比例关系, τ 影响 PID 的 3 个参数的取值。如果只用一组 PID 参数控制真空室温度,控制效果不理想,而将温度从低温到高温划分为几个控制区间,用几组 PID 参数控制,则可优化控制效果。

将真空室温度划分成 5 个控制区间,并设 4 个关键点,用 Z-N 法整定出 PID 参数,4 组整定结果如表 2 所示。

表2 各区间 PID 参数整定结果

Table 2 The parameters of PID tuning results

$\theta / ^\circ\text{C}$	100	250	400	550
PID 参数	K_p	0.80	1.08	1.49
	T_i	390	290	210
	T_d	97.5	72.5	52.5

当室内温度处于 2 个 PID 参数整定点之间时,用线性插值法计算出与该温度对应的 PID 参数,则 PID 参数会随温度 θ 和纯滞后时间 τ 的变化而变化。利用线性插值法,通过较少的计算能得到较好的 PID 参数,从而达到较好的控制效果。

下面介绍用线性插值法计算 K_p 的方法。当室内温度分别处在 5 个温度区间内时,采用线性插值的方法计算出与该温度对应的 PID 参数。例如比例系数 K_p 的确定,当温度在 100~250 $^\circ\text{C}$ 之间时, K_p 的值与温度 θ 之间的关系为通过插值节点 (100, 0.80) 和 (250, 1.08) 的直线,即

$$K_p = 0.80 + \frac{0.80 - 1.08}{100 - 250} \times (\theta - 100); \quad (4)$$

当温度低于 PID 最低温度参数整定点时, PID 参数采用最低整定点的数值;当温度高于 PID 最高温度参数整定点时, PID 参数采用最高整定点的数值。

积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 也按此法进行计算。

3 基于粒子群优化算法的PID控制参数优化

3.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 源于对鸟类捕食的研究, 是一种基于群体智能的优化算法。该算法概念简明, 实现方便, 收敛速度快, 参数设置少, 是一种高效的搜索算法。

将PID参数用PSO初始化为一群随机粒子, 在每次迭代中, 粒子通过跟踪2个最优解来自动更新, 最终达到从全空间搜索最优解的目的。

在一个D维的目标搜索空间中, 每个粒子看成是空间的一个点。设种群由m个粒子构成, 则第i个粒子的D维位置矢量可表示为 $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$; 粒子i的飞行速度可表示为 $v_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$; 粒子i迄今为止搜索到的最优位置为 $p_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$; 整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置为 $p_g=(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。在每次迭代中, 粒子根据式(5)和(6)的规则来更新速度和位置:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^k), \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad (6)$$

式(5)和(6)中:

$d=1, 2, \dots, D$, D 为粒子的维数;

r_1, r_2 为[0,1]之间的随机数, 这2个参数用来保持群体的多样性;

c_1, c_2 是学习因子, 在区间[0,2]上随机取值, 它使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力, 从而向自己的最优点及种群内历史最优点靠近;

ω 为惯性权重, 调整其值可改变粒子的搜索范围和搜索速度, 随迭代次数增加该算法自适应减小 ω 的取值, 有利于在粒子的搜索能力和算法收敛速度之间取得平衡, ω 值按

$$\omega(k) = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} k$$

来更新, 其中 $\omega(k)$ 为第k次迭代用的惯性权重。

3.2 PID控制参数优化

传统整定方法难以实现参数的最优整定, 容易产生振荡和大超调。智能整定方法, 如遗传算法、神经网络算法等也还存在一些不足, 前者计算量大且编码解码过程繁琐; 后者隐含层数目、神经元个数以及初始权值等参数选择都没有一般的方法。基于粒子群优化算法的PID参数寻优算法, 是一种简单, 易于实现且效率较高的寻优方法^[4-5]。

在进行PID参数优化时, 需建立综合评价各项性能指标的目标函数, 本文选择的目标函数为

$$J = \int_0^{+\infty} |e(t)| dt, \quad (7)$$

式中: J 为IAE准则; $e(t)$ 为温度误差。

在初始群体生成时, 将表2中4组共12个PID参数作为各自参数取值范围的中枢值, 在该中枢值 $\pm 50\%$ 的范围内采用随机生成的方式生成30个粒子, 每个粒子均为12维。针对式(2)所示的控制对象, 采用MATLAB进行仿真, 经过200次迭代优化后的PID参数如表3所示

表3 各区间PID参数优化结果

Table 3 The parameters of PID optimization results		100	250	400	550
PID 参数	K_p	0.71	0.92	1.27	2.11
	T_i	445	340	242	144
	T_d	131	83	62	37

4 比例因子模糊自调整控制

采用分段PID控制的方法, 可较好地解决纯滞后时间随温度变化造成的控制问题, 但镀膜材料不同, 电网电压波动等因素导致的热惯性系数变化和比例系数变化所带来的控制问题仍不能有效解决。比例因子在线模糊自调整控制, 能有效地减少系统跟踪误差, 改善控制品质^[6-7]。

控制系统如图2所示, 系统采用比例因子在线模糊自调整控制, 在数字PID输出端增加一个输出比例因子 K_u , K_u 的值由模糊控制系统进行校正调准。模糊控制器的作用是使控制量 u 随着温度误差 e 和温度误差变化率 ec 的变化而自动调节。不同的 e 和 ec 下, 控制量 u 的输出自调整满足如下规律: 在输出温度误差 e 很小的情况下, $K_u=1$; 若输出温度高于设定温度, 则模糊系统减少 K_u 的值并减小控制量 u ; 若输出温度低于设定温度, 则模糊系统调大 K_u 的值并增加控制量 u 。

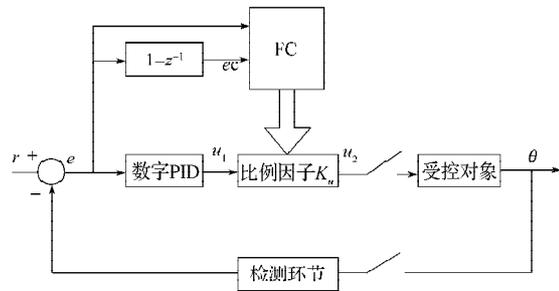


图2 真空室比例因子在线模糊自调整控制

Fig. 2 The on-line self-tuning fuzzy control of vacuum chamber scaling factor

4.1 语言变量隶属度的确定

模糊控制器采用二维输入, 一维输出, 实际输入

量为温度误差 e , 变化范围为 $[-15,+15]$, 温度误差变化率 ec , 变化范围为 $[-0.15,+0.15]$; 输出量为控制量 u , 变化范围为 $[-1,+1]$ 。设经模糊化后得到的模糊语言变量 E, EC, U 的模糊集合均为 {负大, 负小, 零, 正小, 正大} 并用 {NB, NS, Z, PS, PB} 表示。将 e, ec 论域量化为 $\{-6,-3,0,+3,+6\}$, 则 e 的量化因子为 $k_1=0.4$, ec 的量化因子 $k_2=40$, u 的论域量化为 $\{-1,-0.5,0,+0.5,+1\}$, 则 u 的比例因子为 $k_3=1$ 。本系统中 NB 和 PB 分别选用 Z 型 (zmf) 和 S 型 (smf), 其他选用三角形 (trimf) 隶属函数。 E, EC, U 的隶属度如图 3~5 所示。

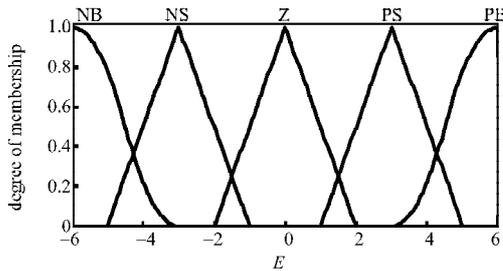


图3 温度误差 E 的隶属度曲线

Fig. 3 The membership curve of error E

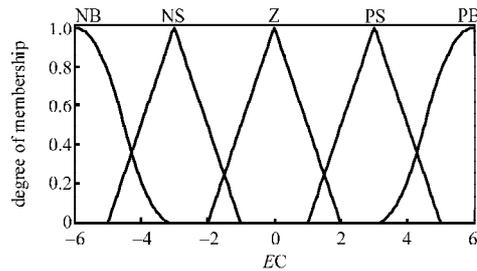


图4 温度误差变化率 EC 的隶属度曲线

Fig. 4 The membership curve of error EC

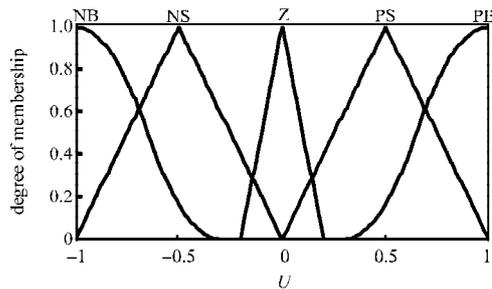


图5 控制量 U 的隶属度曲线

Fig. 5 The membership curve of control U

4.2 模糊控制规则的建立

模糊控制的关键是总结工程技术人员的实际知识和实际操作经验, 建立合适的模糊规则控制表。本系统采用 Mamdani 型推理算法, 根据手动控制经验和模糊自适应 PID 控制的原则, 总结出 25 条控制规则, 如表 4 所示。根据表 4 计算模糊控制量, 采用重心法得到模糊控制的控制量 u 。

表4 模糊控制规则表

Table 4 The table of fuzzy control rules

E	EC				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	NB	NB	NS	NS	Z
Z	NS	Z	Z	Z	PS
PS	Z	PS	PS	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

4.3 比例因子模糊自调整

设数字 PID 控制器的输出为 u_1 , 由模糊控制器校正后复合控制器的输出为 u_2 , 且 $u_2=K_u u_1$, 式中比例因子 K_u 由模糊控制器的输出 u 进行校正调整。为使 PID 精确控制不受干扰, 模糊控制量应仅在温度误差较大时起控制作用, 误差较小时不起作用或者衰减作用的强度。真空室低温时远较高温时难以控制, 低温时的温度误差也大于高温时的温度误差, 所以模糊控制主要在低温时起控制作用, 室内温度越高, 模糊控制效果越低。

前面已经确定 u 的论域范围是 $[-1,+1]$, 用一个大于零的系数 λ 来改变模糊调整作用的整体强度, 即 λ 越大模糊控制调整作用越强, λ 越小模糊控制调整作用越弱, 则 K_u 与 u, λ 的关系可设为

$$K_u = 1 + \lambda u \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\max}} \right),$$

式中 θ_{\max} 为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。

K_u 的控制作用随室内温度 θ 的升高而减弱, 经过反复仿真优选, λ 的值优先确认为 0.7, 此时控制效果较好。

5 仿真研究

图 6 是在 MATLAB 环境下, 通过 Simulink 和模糊逻辑工具箱建立的分段 PID 控制与模糊自适应 PID 控制的仿真模型, 仿真时间取 23 880 s, 步长为 5 s。模型中有 5 个 MATLAB Function 模块, 模块 rin 为可编程的给定输入; 模块 kp_adaptive, ti_adaptive, td_adaptive 分别为按表 3 和式 (4) 进行插值计算的 3 组 PID 参数; 模块 delaytime 为按式 (3) 计算的随温度变化的纯滞后时间 τ 。

图 7 为模块 rin 的温度工艺曲线。

图 8 为分段 PID 与模糊自适应 PID 仿真曲线。比较 2 条曲线可知, 在低温区, 分段 PID 控制下的温度误差较大, 局部温度误差超过 $18\text{ }^\circ\text{C}$; 加入模糊控制后, 温度误差减小, 最大温度误差在 $13\text{ }^\circ\text{C}$ 之内。在高温区, 分段 PID 与模糊自适应 PID 曲线几乎重合, 此时模糊控制减弱。

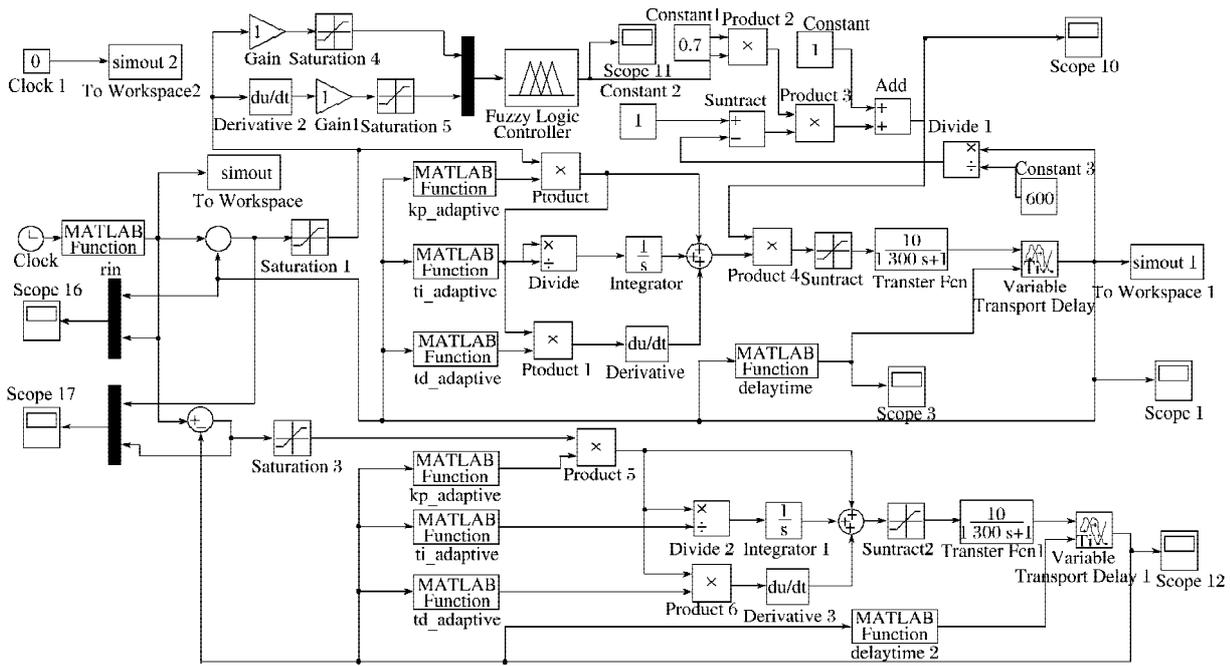


图6 分段PID与模糊自适应PID仿真模型

Fig. 6 The simulation model for ordinary PID and fuzzy adaptive PID

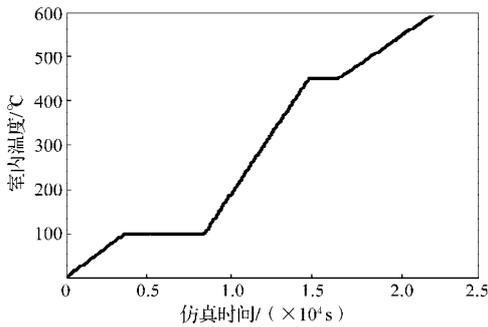


图7 温度工艺曲线

Fig. 7 The temperature technology curve

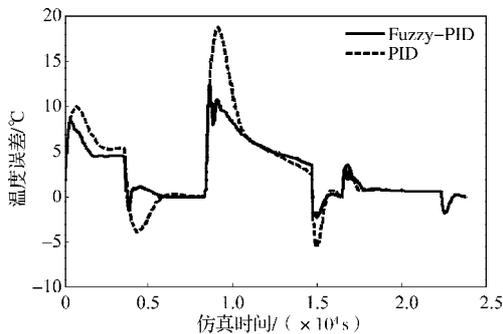


图8 分段PID与模糊自适应PID仿真曲线比较

Fig. 8 The simulation curves of ordinary PID and fuzzy adaptive PID

6 结语

综上所述，多弧离子镀膜温度在低温区较高温区难以控制，温度误差在低温区比高温区大，本文

采用模糊控制器对PID控制器的输出进行比例调整，低温时加大模糊控制作用，高温时减少模糊控制作用。图8表明，低温时由于模糊控制器的作用，温度误差较分段PID控制的小；高温时分段PID与模糊自适应PID曲线几乎重合，这时的温度误差也相对较小。因此，此控制方案可行、有效，较好地优化了控制效果。

参考文献：

- [1] 张 钧, 赵彦辉. 多弧离子镀膜技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 66-72.
Zhang Jun, Zhao Yanhui. Multi-Arc Ion Plating Technology and Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 66-72.
- [2] 宗素兰, 章家岩, 尹成贺. 模糊PID控制在温度控制系统中的应用[J]. 工业控制计算机, 2010, 23(8): 75-76.
Zong Sulan, Zhang Jiayan, Yin Chenghe. Application of Fuzzy PID Control in Temperature Control System[J]. Industrial Control Computer, 2010, 23(8): 75-76.
- [3] 李 川. 模糊PID在加热炉温度控制系统中的应用[J]. 冶金自动化, 2009, 33(3): 56-58.
Li Chuan. Application of Fuzzy PID in Control System of Heating Furnace[J]. Metallurgical Industry Automation, 2009, 33(3): 56-58.
- [4] 王 侠, 赵燕云, 马宪民. 基于微粒群算法的钢水液位模糊控制器的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007 (5): 39-40.
Wang Xia, Zhao Yanyun, Ma Xianmin. The Design of a Fuzzy Type Liquid Steel Level Controller Based on PSO

- Algorithm[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2007(5): 39-40.
- [5] 郝万君, 强文义, 柴庆宣, 等. 基于粒子群优化的一类模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 586-588.
Hao Wanjun, Qiang Wenyi, Chai Qingxuan, et al. Design of Fuzzy Controller Based on Particle Swarm Optimization [J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 586-588.
- [6] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 102-106.
Liu Jingkun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 102-106.
- [7] 凌云, 李毅梅, 何丽平. 模糊自适应在真空烧结炉温度控制中的应用[J]. 制造业自动化, 2007, 2(9): 69-71.
Ling yun, Li Yimei, He Liping. A Fuzzy Adaptive Control Method on the Temperature of Cemented Carbide Vacuum Sintering Furnace[J]. Manufacturing Automation, 2007, 29(9): 69-71.

(责任编辑: 邓光辉)

(上接第54页)

- [6] 但斌, 刘飞. 绿色供应链及其体系结构研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(11): 1232-1234.
Dan Bin, Liu Fei. Study on Green Supply Chain and Its Architecture[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(11): 1232-1234.
- [7] 汪应洛, 王能民, 孙林岩. 绿色供应链管理的基本原理[J]. 中国工程科学, 2003, 5(11): 82-87.
Wang Yingluo, Wang Nengmin, Sun Linyan. The Basic Principles of Green Supply Chain Management[J]. Engineering Science, 2003, 5(11): 82-87.
- [8] Zhu Qinghua, Cote R P. Integrating Green Supply Chain Management into An Embryonic Eco-Industrial Development: A Case Study of the Guitang Group[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12: 1025-1035.
- [9] Van Hoek R I. Case Studies of Greening the Automotive Supply Chain through Technology and Operations[J]. International Journal of Environmental Technology and Management, 2001, 1(1): 140-163.
- [10] 张汉江, 吴娜, 唐维. 实施绿色供应链管理, 促进制造业可持续发展的意义与对策分析[J]. 生态经济, 2006(5): 241-244.
Zhang Hanjiang, Wu Na, Tang Wei. Significations and Strategies of Developing Manufacturing by Advancing Green Supply Chain Management[J]. Ecological Economy, 2006(5): 241-244.
- [11] 陈梅, 刘险峰, 周超. 石油企业实施绿色供应链管理的障碍及对策研究[J]. 价值工程, 2008(2): 57-58.
Chen Mei, Liu Xianfeng, Zhou Chao. To Study on the Petroleum Enterprises' Obstacle and Countermeasure of Implementing Green Supply Chain Management[J]. Value Engineering, 2008(2): 57-58.
- [12] 黄芸飞. 中国连锁零售业: 绿色供应链管理的实施[J]. 上海商学院学报, 2008, 9(5): 45-47.
Huang Yunfei. Management of the Green Supply Chain in Chain's Retail Industry[J]. Journal of Shanghai Business School, 2008, 9(5): 45-47.
- [13] 翟金芝. 低碳经济下中国零售业发展的对策[J]. 经济与管理, 2010, 24(5): 84-87.
Zhai Jinzhi. Research on Countermeasure for Retail Trade Development in China Oriented Low Carbon Economy[J]. Economy and Management, 2010, 24(5): 84-87.
- [14] 钱宇. 低碳经济下的绿色供应链管理途径[J]. 中国水运, 2010(3): 24-25.
Qian Yu. The Way of Green Supply Chain Management under Low-Carbon Economy[J]. Chinese Shipping, 2010(3): 24-25.
- [15] 戴宏民, 戴佩华, 周均. 碳减排与绿色包装[J]. 包装学报, 2010, 2(2): 48-51.
Dai Hongmin, Dai Peihua, Zhou Jun. Carbon Emission Reduction and Green Packaging[J]. Packaging Journal, 2010, 2(2): 48-51.

(责任编辑: 蔡燕飞)