文章编号:1000-8152(2011)01-0094-07

基于自适应噪声抵消的CZ单晶炉炉膛温度信号处理

梁炎明,刘 丁,赵 跃

(西安理工大学自动化与信息工程学院,陕西西安710048)

摘要:为滤除CZ单晶炉炉膛温度信号在单晶生长过程中存在的低频干扰,提出一种基于噪声抵消技术的滤波方法.首先利用傅立叶级数构造出低频干扰的逼近信号,然后根据炉温信号的缓变特征建立能够获取低频干扰逼近信号的抵消器误差函数,最后利用一种改进的粒子群优化算法优化误差函数获得低频干扰的逼近信号,并用该逼近信号抵消低频干扰.实验结果表明,所提出的自适应噪声抵消滤波算法能够有效滤除CZ单晶炉炉膛温度信号中的低频干扰,并优于常用的滤波方法.

关键词: CZ单晶炉; 炉膛温度信号; 低频干扰; 滤波; 傅立叶级数; 自适应噪声抵消; 粒子群优化 中图分类号: TP14; TG232.5 文献标识码: A

Temperature signal processing based on adaptive noise cancellation for CZ crystal growing furnace

LIANG Yan-ming, LIU Ding, ZHAO Yue

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: To filter the low-frequency interferences from the temperature signal in the single crystal growth process within a CZ crystal growing furnace, we propose a filtering method based on adaptive noise cancellation. Firstly, the approximation signals of the low-frequency interferences are modeled by using Fourier series. Secondly, based on the slow variation characteristics of the furnace temperature signal, the error function of cancellation is developed. Finally, the error function is minimized with an improved PSO (particle swarm optimization) algorithm to obtain the approximate signals of the low-frequency interferences. These approximate signals are employed to offset the low-frequency interferences. Experiments show that this filtering method based on adaptive noise cancellation can efficiently attenuate the low-frequency interferences in the temperature signal of CZ crystal growing furnace, and is better than the most commonly-used methods in numerical precision.

Key words: CZ crystal growing furnace; furnace temperature signal; low-frequency interference; filtering; Fourier series; adaptive noise cancellation; PSO

1 引言(Introduction)

基于Czochralski单晶生长法的设备称为CZ单晶 炉.近年来随着晶体生长尺寸不断加大,内在晶质 要求越来越高,对其工艺参数实施有效控制是十分 必要的,尤其对炉膛温度实施有效控制更是重中之 重.由于炉膛温度在单晶生长过程中会受到氩气充 气、埚转、埚升、晶转、晶升、炉体冷却及炉膛加热 等环节的干扰,再加上测量传感器本身的噪声,导致 温度测量信号波动较大,无法直接应用于温度控制, 因此需要对温度测量信号进行滤波处理.实验表明, 常用的滤波方法如均值滤波、中值滤波和一阶滞后 滤波等对炉膛温度信号的滤波效果较差,无法满足 工艺要求.炉膛温度信号的频谱表明,在单晶生长过 程中,炉膛温度信号存在多个低频干扰信号.常用滤 波方法不能有效滤除这些低频干扰信号,因此如何

收稿日期: 2009-11-18; 收修改稿日期: 2010-04-16. 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX02011001). 有效滤除低频干扰信号成为单晶炉炉膛温度信号滤 波问题的关键.

自适应噪声抵消滤波方法能有效滤除信号中的 噪声,在信号提取方面有着广泛的应用^[1~3].参考输 入信号和自适应算法是自适应噪声抵消滤波器的 关键.常用的参考输入信号有正弦信号和与噪声相 关的信号.自适应陷波滤波器使用正弦信号作为参 考输入信号,能够抵消某一固定频率的干扰信号^[4]. 文献[5~8]介绍的自适应噪声抵消滤波器采用了与 噪声相关的信号作为参考输入信号,该类滤波器无 需知道噪声的类型和参数就可以抵消噪声,但参考 输入信号不易获得.常用的自适应算法有最小均 方(LMS)算法、递推最小二乘(RLS)算法以及它们的 改进算法^[9~13].上述介绍的自适应陷波滤波器及其 他噪声抵消滤波器都不能直接应用于单晶炉炉膛温 第1期

炉膛温度测量信号受扰分析(Analysis of disturbance in furnace temperature measurement signal)

群算法来加快滤波器系数的收敛.

以TDR-150型CZ单晶炉为例,分析炉膛温度测 量信号的受扰情况, TDR-150单晶炉可生长12英寸 单晶,是我国目前技术水平较高的晶体生长设备,它 由炉体、加热装置、冷却装置、充气装置和传动装置 构成,其中加热装置是单晶炉的核心部分,其工作状 态的好坏直接影响晶体生长质量. TDR-150单晶炉 采用的测温部件是红外温度传感器,该传感器具有 较高的灵敏度,能及时反映温度的变化,在晶体生长 过程中,炉膛温度测量信号受到较大的干扰,这些干 扰主要来自氩气充气过程、坩埚转动、冷却过程、加 热器电源纹波以及红外温度传感器测量噪声.其中 由坩埚转动和加热器电源纹波引起的干扰属于周期 性干扰. 图1为单晶生长过程中没有经过滤波处理的 某段温度曲线(原始温度曲线)及其功率谱.其功率谱 反映出,测量信号中除了包含低频的温度信号之外 还存在数个频率较低的干扰信号.这些低频干扰信 号主要是由坩埚转动和电源输出电压纹波造成的, 而且在晶体生长过程中始终存在.





- 3 炉膛温度测量信号的自适应噪声抵消滤 波方法(Adaptive noise cancellation filtering method of furnace temperature measurement signal)
- **3.1** 自适应噪声抵消滤波器的基本原 理^[14](Fundamental principle of adaptive noise cancellation filter)

自适应噪声抵消滤波器是依靠抵消信号中噪声

而实现滤波的,由抵消器和自适应滤波器构成,其原 理框图如图2所示.主输入信号d(n)含有待抵消的加 性噪声v(n),可表示成d(n) = s(n) + v(n).参考输入 信号x(n)是一种与噪声相关,但与原始信号s(n)无 关的信号,可以表示成x(n) = v(n) * g(n),其 中g(n)为一未知线性滤波器的单位脉冲响应.通过 利用x(n)与v(n)的相关性和x(n)与s(n)的独立性, 使参考输入x(n)通过自适应滤波器与主输入d(n)中 的噪声v(n)逼近并相减,获得原始信号s(n).滤波 器系数是根据抵消器误差输出e(n)通过自适应 算法进行自动调整,使其输出信号y(n)在均方误 差E{ $|e(n)|^2$ }最小的意义下,趋近于主输入信号中的 噪声分量v(n),从而使系统的误差输出信号e(n)趋 近于主输入信号中的原始信号s(n).整个自适应抵 消过程可用数学描述为:

$$y(n) = w^{\mathrm{T}}(n)x(n), \qquad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - w^{\perp}(n)x(n), \quad (2)$$

$$\min J = \mathbb{E}\{|e(n)|^2\}.$$
 (3)

其中:w(n)为滤波器系数,n为时间序列.





对于自适应噪声抵消滤波器,参考输入信号以及 自适应算法的选择是影响信号去噪效果的关键.选 择的参考输入信号要与信号中的噪声相关,这样才 能有效抵消噪声,否则抵消的不是噪声.适当的自适 应算法能够使滤波器系数快速收敛,从而使噪声抵 消的效果更加显著.

3.2 自适应噪声抵消滤波器设计(Design of adaptive noise cancellation filter)

要使自适应噪声抵消器的抵消效果明显,要求 参考输入信号与干扰信号相关.对于CZ单晶炉,由 于无法提供一个专门测量干扰信号的通道,利用测 量手段很难直接获取与干扰信号相关的参考输入信 号,需要另外确定.

根据自适应噪声抵消原理,要提取目标信号 s(n),需要用滤波器的输出y(n)逼近干扰信号v(n). 对于单晶炉的炉膛温度信号,v(n)主要是由数个低 频信号叠加形成的,根据这个特点,可以用傅立叶级 数来逼近v(n),则y(n)可以表示成:

$$y(n) = \sum_{i=1}^{k} \left(a_i \cos \omega_i n \Delta t + b_i \sin \omega_i n \Delta t \right) = \sum_{i=1}^{k} \left(a_i \sin(\omega_i n \Delta t + \frac{\pi}{2}) + b_i \sin \omega_i n \Delta t \right).$$
(4)

其中: ω_i 为干扰信号频率; Δt 为采样间隔; a_i , b_i 为调 节系数; k为频率成分数.

式(4)便是噪声抵消器中滤波器的表达式,可以 看出,如果选用与干扰频率相同的正弦信号作为参 考输入信号,则只要适当调整滤波器系数a_i, b_i, 就 可以使y(n)逼近v(n),从而抵消低频干扰. 根据自 适应噪声抵消滤波器原理,滤波器系数ai,bi是通 过抵消器的误差输出进行调整,但如果直接利用 式(4)中的u(n)与主输入信号d(n)的误差e(n)调整滤 波器系数 $a_i, b_i, 会使y(n)$ 不是逼近v(n),而是逼近 炉膛温度信号s(n),会将部分s(n)抵消,使s(n)的有 用信号丢失. 这是因为式(4)的y(n)与缓变的温度信 号s(n)不是独立无关的,反而有较大的相关性,而 且噪声v(n)能量较小,温度信号s(n)能量较大,根据 式(3), 会抵消能量大的温度信号s(n). 为了使y(n)逼 近的是v(n),而不是s(n),需要在式(4)的基础上构 造新的函数,用该函数抵消主输入信号d(n)时,能 使y(n)抵消v(n). 由于在单晶生长过程中, 炉膛温度

信号是缓变的信号,在某段时间内可以认为是常量,因此用常量*c*逼近温度信号*s*(*n*),比用其他的函数逼近效果好.本文将常量*c*和式(4)叠加,即:

$$y_t(n) = c + \sum_{i=1}^k \left(a_i \cos(\omega_i n \Delta t) + b_i \sin(\omega_i n \Delta t) \right) = c + \sum_{i=1}^k \left(a_i \sin(\omega_i n \Delta t + \frac{\pi}{2}) + b_i \sin(\omega_i n \Delta t) \right).$$
(5)

通过式(5) $y_t(n)$ 和d(n)的误差 $e_t(n)$ 来调整系数 a_i, b_i 和c,可使系数c逼近s(n),从而使y(n)逼近v(n).

上述分析表明, y(n)只能抵消噪声v(n)的低频部分, 而无法抵消其高频部分, 因此抵消器的输出端还存在高频干扰信号. 为滤除v(n)的高频干扰, 需要在抵消器的输出端增加低通滤波器. 图3是本文的自适应噪声抵消滤波器结构框图, 参考输入信号为正弦信号, 其数量与干扰信号的频率成分多少有关.

主输入信号d(n)经过图3滤波器后,能量较大的 低频噪声和高频噪声被滤除,但输出信号O(n)还会 存在一些能量较小的低频噪声,这些噪声会引起测 量误差,但由于能量小,其引起的误差是可以接受 的.实验表明,由这些能量较小的低频噪声所引起的 误差是在工艺要求允许之下的.





3.3 利用改进粒子群算法优化自适应滤波器 参数(Optimization of adaptive filter parameters with improved PSO algorithm)

基于图3结构的滤波器参数 a_i , b_i 和c是通过 $y_t(n)$ 和d(n)的误差 $e_t(n)$ 来调整. 依据抵消原理, 本文定义均方误差E{ $|e_t(n)|^2$ }作为目标函数,即

其中

$$J = \mathrm{E}\{|e_t(n)|^2\} = \mathrm{E}\{|d(n) - y_t(n)|^2\}.$$
 (6)

$$y_t(n) = c + \sum_{i=1}^k \left(a_i \cos(\omega_i n \Delta t) + b_i \sin(\omega_i n \Delta t) \right).$$

当目标函数J达到最小时,参数c逼近于s(n), y(n) 逼近于v(n).本文没有采用常用的LMS算法和 RLS算法优化式(6),这是因为式(6)属于多峰函数, 这些算法较难搜索到全局最优值,因此提出了一 种改进的粒子群优化算法对式(6)进行优化.经实 验验证,该方法能够较快搜索到全局最优值. 粒子群优化(particle swarm optimization, PSO) 算法来源于鸟群捕食行为, 是一类基于群智能的 随机优化算法^[15].由于PSO算法简洁, 需要调整的 参数较少, 应用非常广泛.但PSO存在早熟和在进 化后期收敛速度慢等问题, 目前提出了许多PSO的 改进算法^[16~21].本文为了提高PSO的收敛速度并 抑制早熟现象, 将IPSO算法^[20]与一种具有逸出机 制的混沌粒子群优化算法(CPSO)^[22]相结合, 得到 了一种改进的粒子群优化算法(CIPSO), 该算法除 能够有效抑制PSO早熟现象外, 还具有较快的收 敛速度.

基本PSO算法^[15]的数学描述为: 假设搜索的空 间为D维, 群体有m个粒子, 其中第i个粒子的位置 可用一个D维向量表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^{\mathrm{T}};$ 第i个粒子的飞行速度可以表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^{\mathrm{T}};$ 第i个粒子的历史最优位置为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^{\mathrm{T}};$ 粒子群体的历史最优位置 为 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})^{\mathrm{T}}.$ 第i个粒子当前时刻 的速度和位置是按以下两式进行调整:

$$v_{in}(k+1) =$$

$$v_{in}(k) + c_1 r_1(p_{in}(k) - x_{in}(k)) +$$

$$c_2 r_2(p_{gn}(k) - x_{in}(k)),$$
(7)

$$x_{in}(k+1) = x_{in}(k) + v_{in}(k+1).$$
(8)

其中: r_1 和 r_2 是(0,1)之间的随机数; c_1 和 c_2 为学习 因子; $n = 1, 2, \dots, D$.

基本PSO算法容易陷入早熟的一个重要原因 是该算法缺乏一种有效跳出局部最优的机制.为 此,文献[22]提出了一种具有逸出机制的混沌粒 子群优化算法(CPSO),该算法根据群体适应度方 差σ²自适应地进行逸出操作,使粒子能够自动跳 出局部最优,逸出时采用混沌优化算法更新粒子 位置.该算法的方差σ²按式(9)进行计算:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{N} \left[(f_i - \bar{f}) / f \right]^2.$$
(9)

其中: *f_i*是第*i*个粒子的适应度; *f*是目前粒子群粒子的平均适应度; *f*为归一化因子:

$$f = \begin{cases} \max(|f_i - \bar{f}|), \max(|f_i - \bar{f}|) > 1, \\ 1, \max(|f_i - \bar{f}|) \le 1. \end{cases}$$
(10)

而混沌优化算法则采用Logistic映射实现,如下式:

$$x_{n+1} = 4x_n(1 - x_n). \tag{11}$$

CPSO在一定程度上有效抑制了算法的过早收 敛,但CPSO对粒子飞行速度的调整是通过个体历 史最优*p_{in}*和群体全局最优*p_{gn}*这两种信息实现的,

如式(12)所示:

$$v_{in}(k+1) = \gamma [wv_{in}(k) + c_1 r_1 (p_{in}(k) - x_{in}(k)) + c_2 r_2 (p_{gn}(k) - x_{in}(k))].$$
(12)

其中: $w(k) = (w_{int} - w_{end})(T_{max} - k)/T_{max} + w_{end}$ 为惯性权重, T_{max} 为最大进化代数, w_{int} 为初始惯性权值, w_{end} 为进化至最大代数时的惯性权值; $\gamma = \frac{2}{\left|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}\right|}$ 为压缩因子, $\phi = c_1 + c_2$,

且 $\phi > 4$. 粒子间的这种简单信息交互使得**CPSO** 需要进行较多的逸出操作,影响其全局收敛速度.

为了使粒子间能够进行更多的信息交互,文 献[20]介绍了一种改进PSO算法(IPSO),该算法将 基本粒子群算法的粒子行为从基于个体极值和 全局极值的模式变为基于个体极值中心和全局 极值的模式,增强了粒子间的信息交互,有效提 高了粒子的全局寻优能力,亦能抑制算法早熟.因 此,本文在CPSO的速度调整式(12)中引入IPSO的 个体极值中心,用该极值中心代替CPSO速度调整 式(12)中的个体极值,得到一种改进的粒子群优化 算法(CIPSO),如式(13)所示:

$$v_{in}(k+1) = \gamma [wv_{in}(k) + c_1 r_1(p_{dn}(k) - x_{in}(k)) + c_2 r_2(p_{gn}(k) - x_{in}(k))].$$
(13)

其中 $p_{dn}(k) = (\sum_{i=1}^{m} p_{in}(k))/m为个体极值中心点.$

CIPSO算法除具有混沌逸出机制外,还增强 了粒子间的信息交互,有效提高算法的收敛 速度并抑制早熟,其具体实现步骤同文献[22]. 用CIPSO优化式(6),能够较快获得全局最优值.

4 实验及结果分析(Experimental results and analysis)

4.1 CIPSO优化算法验证(Verification of CIPSO optimization algorithm)

本文通过5个典型函数对CIPSO算法进行性 能测试,并与基本PSO、CPSO和IPSO进行比较, 这5个测试函数经常用于优化算法的测试.表1列 出了这些函数的表达式、搜索范围、全局最小值 和全局最优点. Sphere函数是一个连续、简单的 单态函数,通常用来分析算法的执行性能; Rosenbrock函数的全局最优点位于一个平滑、狭长的 抛物线形山谷内,由于该函数为优化算法提供的 信息较少,要找到全局最小点是比较困难的,因 此,该函数通常用来评价优化算法的执行效率;其 余3个函数都具有广泛的搜索空间和大量的局部 极小点,属于复杂的非线性多模态函数. 本文定义了两个性能指标对优化算法进行定量评价:一个是平均值指标,另一个是达标值指标.平均值指标是指在指定迭代次数条件下(本文采用2000代),经过多次实验(本文采用50次)得到的最优适应度平均结果;达标值指标是指多次实验(本文采用50次)达到指定目标(即停止准则)所需时间的平均值.很明显,平均值指标用来反映搜

索精度,而达标值指标用来反映收敛速度.

实验参数作如下设置: 群体规模均为30个粒子, 学习因子 c_1 , c_2 均取2.5, 粒子最大速率 v_{max} 取200, 适应度方差 σ^2 取0.01. 表2列出了测试函数对基 本PSO, CPSO, IPSO和CIPSO的测试结果. 表2表 明,本文提出的CIPSO算法具有较高的收敛速度 和搜索精度,优于其他3种粒子群算法.

Table 1 Standard test functions								
测试函数	函数表达式	搜索范围	全局最小值	全局最优点				
Sphere	$f_1(oldsymbol{x}) = \sum\limits_{i=1}^n x_i^2$	$(-100, 100)^n$	0	$(0,0,\cdots,0)$				
Rosenbrock	$f_2(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^n \left(100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2\right)$	$(-50, 50)^n$	0	$(1,1,\cdots,1)$				
Griewank	$f_3(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^n x_i^2 / 4000 - \prod_{i=1}^n \cos(x_i / \sqrt{i}) + 1$	$(-600, 600)^n$	0	$(0,0,\cdots,0)$				
Rastrigin	$f_4(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^n \left(x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10 \right)$	$(-5.12, 5.12)^n$	0	$(0,0,\cdots,0)$				
Shaffer	$f_5(\boldsymbol{x}) = 0.5 + \frac{(\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5)}{(1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2))^2}$	$(-100, 100)^n$	0	$(0,0,\cdots,0)$				

表	1 标准测试函数
Table 1	Standard test functi

表 2 几种PSO算法的性能对照表

Table 2 The performance indicators comparison table of several PSO algorithms

维数	停止准则	CIPSO平均值	IPSO平均值	CPSO平均值	PSO平均值	
		达标值/s	达标值/s	达标值/s	达标值/s	
30	30	0.01	3.11e-28	4.31e-23	2.44e-23	1.54e-12
	0.01	0.274	0.458	0.521	0.879	
30	100	19.2875	101.3228	76.5172	347.1039	
		0.605	0.758	0.703	1.273	
30	30	0.01	2.30e-04	1.79e - 02	6.31e-04	0.0729
	0.01	0.879	1.021	1.017	1.937	
30	100	9.3795	21.4505	42.2513	185.0426	
		0.425	0.683	0.72	0.844	
2	0.01	1.21e-09	1.90e-09	2.07e-09	3.95e-08	
		0.023	0.057	0.085	0.313	

4.2 基于自适应噪声抵消的炉膛温度信号滤 波(Furnace temperature signal filtering based on adaptive noise cancellation)

本次实验的数据来自图1中的温度数据,共 有1000个.实验参数设置如下:首先通过快速傅立 叶变换可得温度信号的主要低频干扰信号的频率 为 $\omega_1 = 0.23$ Hz, $\omega_2 = 1.31$ Hz和 $\omega_3 = 3.75$ Hz,即 频率成分数k = 3,并把这3个频率作为滤波器参 考输入正弦信号的频率;采样间隔 $\Delta t = 0.1$ s;滤 波器参数 a_i , b_i (i = 1, 2, 3)和c的初值在[-10, 10]范 围内随机确定;粒子群粒子的个数取30个;迭代步 数取1000步.考虑到直接采用式(6)作为适应度函 数,函数值太大,因此将式(6)取对数作为适应度函数,实验结果如图4~图6所示.

从图4可以看出,前120步是滤波器参数a_i, b_i (i = 1,2,3)和c的收敛过程,滤波效果不如均值滤 波,波动较大,可以通过对参数a_i, b_i(i = 1,2,3)和 c初值的调整来改善.在120步以后,由于参数a_i, b_i(i = 1,2,3)和c基本收敛,滤波效果立即得到改 善,波动幅度限制在1°以内,效果明显优于均值 滤波.由于均值滤波无法有效滤除低频干扰,因 此在滤波时间内,波动较大.图5为滤波器输出信 号y(n)的波形图,该图表明y(n)在120步以后逐渐 逼近干扰信号v(n).图6反映出粒子群适应度函数 的收敛过程,同样表明在120步以后收敛.实验结 果表明自适应噪声滤波器能有效处理CZ单晶炉炉 膛温度测量信号,效果较理想,符合工艺要求.



图 4 滤波效果对比 Fig. 4 Comparison of filtering effect



图 5 滤波器输出波形 Fig. 5 The output waveform of filter





5 结论(Conclusion)

针对单晶生长过程中炉膛温度信号存在的低

频干扰,设计出适用于炉膛温度信号特点的自适 应噪声抵消滤波器.利用该滤波器能有效滤除能 量较大的低频噪声,保证温度测量信号符合工艺 要求,效果优于常用的滤波方法.所提出的改进粒 子群优化算法能够有效抑制早熟并加快收敛速度, 将其应用于优化自适应滤波器系数,可使滤波效 果更加显著.本文所提出的自适应噪声抵消滤波 器同样适用于其他受多个低频干扰的的缓变信号 滤波.

参考文献(References):

- 林春生,向前, 龚沈光. 自适应双参考磁场梯度探测原理[J]. 电子 学报, 2004, 32(3): 519 – 521.
 (LIN Chunsheng, XIANG Qian, GONG Shenguang. Principle of adaptive detection using dual-magnetic field gradient inputs as reference[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 519 – 521.)
- [2] 曾庆宁, 欧阳缮, 廖桂生. 基于阵列抗串扰自适应噪声抵消的语音 增强[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 241 – 244.
 (ZENG Qingning, OUYANG Shan, LIAO Guisheng. Speech enhancement based on array cross-talk resistant adaptive noise cancellation[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 241 – 244.)
- [3] 邹东升, 佘龙华, 常文森. 抑制磁浮系统车轨耦合振动的自适应陷波滤波器设计[J]. 信息与控制, 2009, 38(2): 234 238.
 (ZOU Dongsheng, SHE Longhua, Chang Wensen. Design of adaptive notch filter to suppress coupled vibration of maglev vehicle and guideway system[J]. *Information and Control*, 2009, 38(2): 234 238.)
- [4] 沈福民. 自适应信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 144-147.

(Shen fumin. *Adaptive Signal Processing*[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2001: 144 – 147.)

- [5] JUANG C F, LIN C T. Noisy speech processing by recurrently adaptive fuzzy filters[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2001, 9(1): 139 – 152.
- [6] LI Z R, ER M J. Adaptive noise cancellation using IIR-based fuzzy systems[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Netherlands: IEEE, 2004: 5691 – 5696.
- [7] DU C J, YIN H E, WU S C, et al. Visual evoked potentials estimation by adaptive noise cancellation with neural-network-based fuzzy inference system[C] //Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2004: 624 – 627.
- [8] MENG JOO ER, ZHENGRONG LI, HUANING CAI, et al. Adaptive noise cancellation using enhanced dynamic fuzzy neural networks[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2005, 13(3): 331 – 341.
- [9] 王振力, 张雄伟, 杨吉斌, 等. 一种新的快速自适应滤波算法的研究[J]. 通信学报, 2005, 26(11): 1 6.
 (WANG Zhenli, ZHANG Xiongwei, YANG Jibin, et al. Study of a new fast adaptive filtering algorithm[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2005, 26(11): 1 6.)
- [10] 高鹰,谢胜利. 一种变步长LMS自适应滤波算法及分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094 1097.
 (GAO Ying, XIE Shengli. A variable step size LMS adaptive filtering algorithm and its analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8): 1094 1097.)
- [11] 高鹰,谢胜利.变遗忘因子相关函数自适应滤波算法[J].系统工程 与电子技术, 2004, 26(4): 542 – 543.

(GAO Ying, XIE Shengli. Varing forgetting factor correlation function adaptive filtering algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(4): 542 - 543.)

- [12] ELNASHAR AYMAN, ELNOUBI SAID, EL-MIKATI HAMDI. Performance analysis of blind adaptive MOE multiuser receivers using inverse QRD-RLS algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2008, 55(1): 398-411.
- [13] 谢胜利,田森平,柳书棠.基于向量图分析的自适应滤波快速算 法[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 838-842. (XIE Shengli, TIAN Senping, LIU Shutang. Fast algorithms of adaptive filtering based on vector plots analysis[J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(6): 838-842.)
- [14] 王欣, 王德隽. 离散信号的滤波[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 87 - 91. (Wang Xin, Wang Dejun. Discrete signal filtering[M]. Beijing: Pub-
- lishing House of Electronics Industry, 2002: 87-91.) [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 1995: 1942 - 1948.
- [16] SHI Y H, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C] //Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming. New York: Springer-Verlag, 1998: 591 -600.
- [17] 巩敦卫,张勇,张建化,等.新型粒子群优化算法[J]. 控制理论与应 用, 2008, 25(1): 111-119. (GONG Dunwei, ZHANG Yong, ZHANG Jianhua, et al. Novel particle swarm optimization algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(1): 111 - 119.)
- [18] 陈得宝, 赵春霞. 基于内分泌调节机制的粒子群算法[J]. 控制理论 与应用, 2007, 24(6): 1005 - 1009.

(CHEN Debao, ZHAO Chunxia. Particle swarm optimization based on endocrine regulation mechanism[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(6): 1005-1009.)

- [19] 张浩,张铁男,沈继红,等. Tent混沌粒子群算法及其在结构优化 决策中的应用[J]. 控制与决策, 2008, 23(8): 857-862. (ZHANG Hao, ZHANG Tienan, SHEN Jihong, et al. Research on decision-makings of structure optimization based on improved Tent PSO[J]. Control and Decision, 2008, 23(8): 857 - 862.)
- [20] LIANG J J, QIN A K, Ponnuthurai Nagaratnam Suganthan, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 281 - 295.
- [21] CLERC M. The swarm and queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C] //Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington, DC, USA: IEEE, 1999: 1951 - 1957.
- 杨延西,刘丁,辛菁.基于混沌粒子群优化的图像相关匹配算法研 [22] 究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 529 - 533. (YANG Yangxi, LIU Ding, XINGE Jing. Research of image correlation matching method based on CPSO[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(3): 529 - 533.)

作者简介:

梁炎明 (1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为信号处理、复杂 系统建模与控制, E-mail: liangym@xaut.edu.cn;

丁 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复 刘 杂系统的建模与控制、智能机器人控制、智能控制理论与方法、数 字信号处理等,发表论文200余篇,获国家及省部级科技进步奖5项, E-mail: liud@xaut.edu.cn;

赵 跃 (1972—), 男, 副教授, 研究方向为信号处理、复杂系统 建模与控制, E-mail: zhaoyue@xaut.edu.cn.