

基于粒子群算法的一种非线性 PID 控制器

江善和, 江巨浪, 吴 磊

(安庆师范学院 物理与电气工程学院, 安徽 安庆 246011)

摘 要: 基于 PID 控制器各增益参数与偏差信号之间非线性关系, 分析了一种 P/I/D 各部分参数关于误差的理想变化过程, 根据控制与误差之间的调节规律, 给定一组增益参数的连续非线性函数, 构造出一种非线性 PID 控制器。粒子群算法具有对整个参数空间进行高效并行搜索的特点, 采用该算法寻优整定该非线性 PID 控制器的各增益参数。仿真结果表明了所提算法的有效性和所设计控制器的优越性能。

关键词: 粒子群算法; PID 控制器; 非线性函数; 参数优化

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2007)04-0071-04

A Nonlinear PID Controller Based on Particle Swarm Tuning Algorithm

JIANG Shan-he, JIANG Ju-lang, WU Lei

(Physics and Power Engineering Institute, Anqing Teachers College, Anqing 246011, China)

Abstract: The relationship between the error signal and gain parameters of PID controller is nonlinear, the ideal varying process of the individual tuning each part of PID controller concerning error can be analyzed. In this article, it is described that based on the tuning law between the control and error, and formulating the nonlinear function of each gain parameter, the nonlinear PID controller is constructed. Based on the characteristic of particle swarm optimization (PSO) algorithm searching the parameter space concurrently and efficiently, this controller can be optimized by adopting PSO. The simulation results show that the algorithms are effective and the designed controller has excellent performance.

Key words: particle swarm algorithm; PID controller; nonlinear function; optimization of parameter

0 引言

在工业过程控制领域中, PID 控制是最早发展、最为常用的控制策略之一, 这是因为这种控制方式具有算法简单、实现容易、鲁棒性好、可靠性高等一系列优点。为了更好地应用 PID 控制, PID 控制器参数的整定与优化已成为一个重要的研究课题^[1]。随着现代工业系统非线性复杂程度的提高和被控对象不确定性因素的增加, 线性 PID 控制器^[2,3]已往往难以达到满意的控制效果, 而非线性 PID 控制却能真实地反映控制量与偏差信号之间的非线性关系, 在一定程度上克服了线性 PID 控制器的不足, 因此越来越受到控制界的关注^[4]。

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是由 Kennedy 和 Eberhart 等^[5,6]于 1995 年提出的一种新

的进化计算算法, 来源于对群体智能和动物觅食行为的模拟, 具有算法简单、寻优能力强的特点。粒子群优化算法是一类随机全局优化技术, 算法通过粒子间的相互作用发现复杂搜索空间中的最优区域, 目前已广泛应用于函数优化、神经网络训练和模糊系统控制等领域, 已成为国际演化计算界研究的热点^[7]。

文中首先通过分析 PID 参数随系统阶跃响应过渡过程误差变化的理想变化关系, 分别构造了比例、积分和微分增益参数一种关于误差的连续非线性函数, 该非线性函数的变化特性符合参数的理想变化过程, 及时反映误差的控制规律, 因此非线性 PID 控制器能够兼顾动态和静态性能, 从而达到改善控制效果的目的。其次, 由于非线性调节器设计参数较多, 文中将参数设计问题转化为一种参数优化问题, 然后借助于粒子群算法的群智能优化计算方法, 可以方便地找出符合设计要求的一组调节参数。

1 非线性 PID 控制器

非线性 PID 控制器的算式可表示为:

收稿日期: 2006-06-06

基金项目: 省教育厅资助项目 (2006KJ080B); 省高校杰出青年人才基金 (2005jq1119)

作者简介: 江善和 (1975-), 男, 安徽安庆人, 讲师, 研究方向为模糊神经网络理论、智能优化与控制等。

$$u(t) = K_p(e(t))e(t) + K_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} + K_i(e(t)) \int_0^t e(\tau) d\tau = u_p + u_d + u_i \quad (1)$$

式中: $K_p(e(t))$, $K_d(e(t))$, $K_i(e(t))$ 分别为比例、微分和积分系数, 它们都是误差 $e(t)$ 的非线性函数。根据经典控制原理理论, 由图 1 的阶跃响应过程曲线可分析出该非线性 PID 控制器各增益参数的构造思想^[3]。

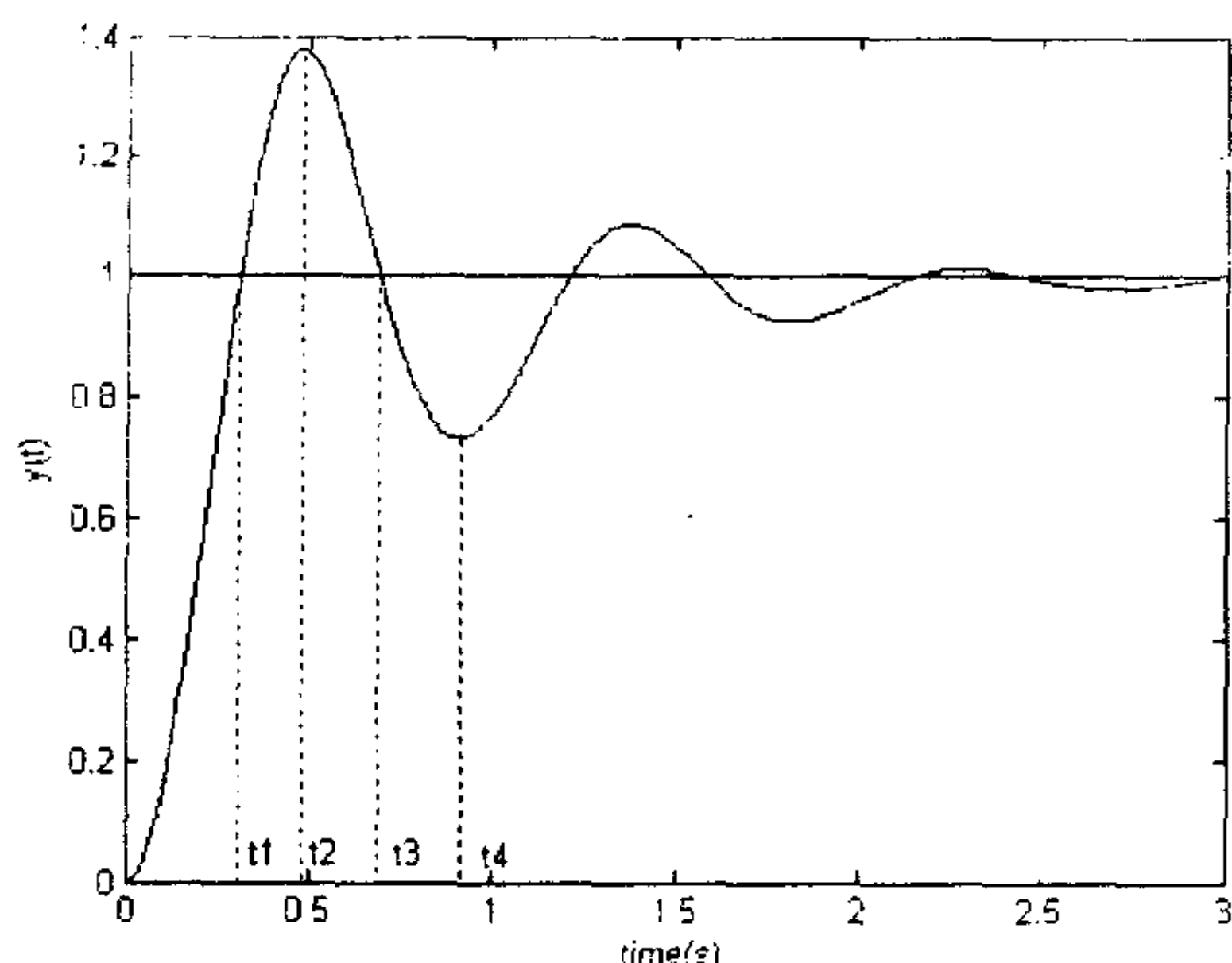


图 1 一般系统阶跃响应曲线

其设计原理为:

1) 比例控制 u_p : 在响应时间 $0 \leq t \leq t_1$ 段, 为保证系统有较快的响应速度, 比例增益参数 K_p 在初始应较大, 同时为减小超调量, e_p 误差逐渐减小时, K_p 也随之减小; 在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 段, 为增大反向控制作用, 减小超调, 期望 K_p 逐渐增大; 在 $t_2 \leq t \leq t_3$ 段, 为使系统尽快回到稳定点, 并不再产生较大惯性, 期望 K_p 逐渐减小; 在 $t_3 \leq t \leq t_4$ 段, 期望 K_p 逐渐增大。显然, 根据上述变化规律, 构造比例系数的调节律为:

$$K_p(e(t)) = k_{p1} + k_{p2}[1 - \sec h(k_{p3}e(t))] \quad (2)$$

2) 微分控制 u_d : 在响应时间 $0 \leq t \leq t_1$ 段, 微分增益参数 K_d 应由小逐渐增大, 这样保证不影响响应速度下, 抑制超调产生; 在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 段, 继续增大 K_d , 从而增大反向控制作用, 减小超调, 在 t_2 时刻, 减小 K_d ; 在 $t_2 \leq t \leq t_4$ 段, 再次逐渐增大 K_d , 同时应限制 K_d 。由此构造微分系数的调节律为:

$$K_d(e(t)) = k_{d1} + k_{d2}/[1 + k_{d3}\exp(k_{d4}e(t))] \quad (3)$$

3) 积分控制 u_i : 当误差较大时, 希望 K_i 不要太大, 增大系统阻尼, 减小超调; 当误差较小时, 希望 K_i 增大, 以消除系统稳态误差。由此构造积分系数的调节律为:

$$K_i(e(t)) = k_{i1}\sec h(k_{i2}e(t)) \quad (4)$$

式(2)~(4)中, $k_{p1}, \dots, k_{p3}; k_{d1}, \dots, k_{d4}; k_{i1}, k_{i2}$ 都为正实常数, 通过调整 k_{p3}, k_{d4}, k_{i2} 的大小分别调整 K_p, K_d, K_i 的变化速率。

根据 PID 控制器中 P/I/D 各部分单独整定的特性, 按上述 PID 控制器参数在系统动态过程中的调节规律, 即各参数与误差 $e(t)$ 之间的非线性函数关系, 分别调节控制器各部分的控制作用。但由于非线性函数参数较多, 要得到最佳的各增益函数, 仅靠经验和仿真调试是难以做到的, 所以文中利用改进的粒子群优化算法对上述非线性函数的各参数进行全局寻优, 以此获得一组最佳的 PID 参数。基于粒子群算法的控制系统结构如图 2 所示。

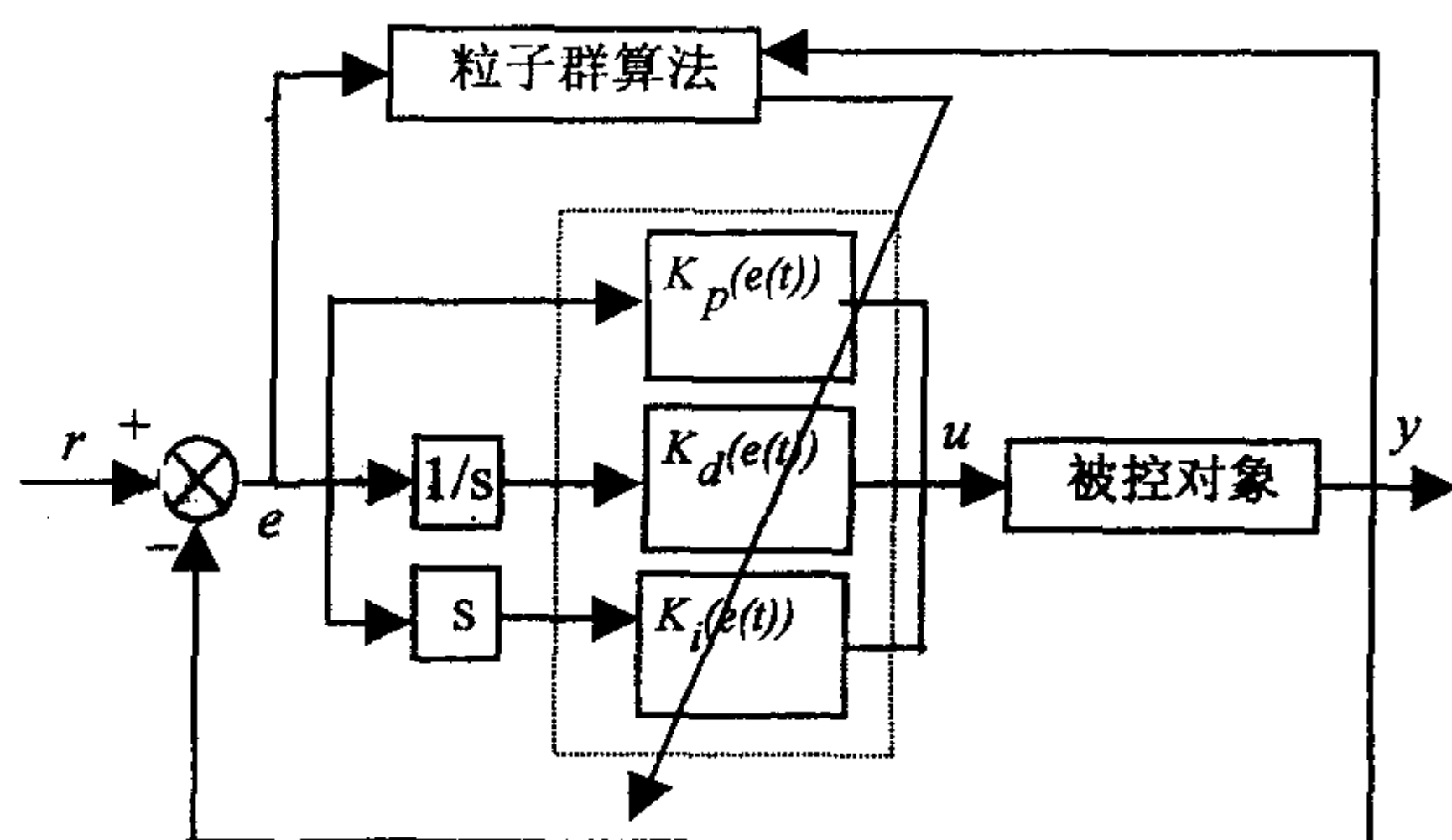


图 2 基于粒子群算法的非线性 PID 控制系统结构图

2 改进的粒子群优化算法

2.1 标准的 PSO 算法

假设在 D 维搜索空间里, 有 m 个粒子组成的粒子群, 其中第 i 个粒子位置可以表示成 D 维向量, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$; 粒子的飞行速度为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$; 该粒子所经历的个体最佳位置可表示为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。在整个粒子群中, 所有粒子经历过的最佳位置为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$, 当第 i 个粒子从 n 代进化到 $n+1$ 代时, 可采用下式进行其速度和位置的更新:

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

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

$$i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D$$

其中, ω 为惯性系数; c_1, c_2 为正常数, 称为加速因子, 用来调节每次迭代的步长; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数; $n = 1, 2, \dots$ 为迭代次数。

2.2 参数分析及改进策略

PSO 算法的搜索性能取决于对全局搜索和局部搜索能力的平衡, 这很大程度依赖于算法的控制参数, 包括种群规模、最大速度、最大代数、惯性系数、加速因子等。为提高算法的性能, 文献[8]提出了许多改进措施。此外, 文献[9]还针对算法中种群规模、迭代次数和粒子速度的选择方法进行了详细分析, 给出了具有一定指导意义的参数选择原则。在上述分析基础上, 文中提出部分改进方法如下。

(1) 惯性系数 w 的改进。

在 PSO 中, w 对算法是否收敛起重要作用, 它使粒子保持运动惯性, 使其有扩展搜索空间的趋势, 有能力探索新的区域。 w 值大些有利于全局搜索, 收敛速度快, 但不易得到精确解; 值小些有利于局部搜索和得到更为精确的解, 但收敛速度慢且有时会陷入局部极值。 w 合适的值在搜索精度和搜索速度方面起协调作用。为此, 根据 PSO 微粒的搜索特征, 文中采用如下 w 的非线性修正公式为:

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times \frac{1 + \cos((\text{iter} - 1)\pi / (\text{MaxStep} - 1))}{2} \quad (7)$$

其中, w_{\max} 为搜索开始时最大的 w ; w_{\min} 为搜索结束时最小的 w ; iter 为迭代所进行的步数; MaxStep 为允许最大迭代步数。

(2) 加速因子 c_1, c_2 的选择。

加速因子对 PSO 的收敛速度影响颇大, 合适的加速因子有利于算法较快收敛和脱离局部极小点, 尤其是对于多峰优化函数。它们代表将每个粒子推向其个体历史最好位置和全局历史最好位置的统计加速项的权值。低的加速因子允许粒子在被拉回之前可以在目标区域外徘徊, 而高的加速因子则可能导致粒子突然地冲向或越过目标区域。通常, $c_1 = c_2 = 2$ 或 $c_1 + c_2 \leq 4$ 。文中借鉴模拟退火算法^[10]的思想, 引入时变加速因子, 赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率接受恶化解。这样粒子在进化过程中, 根据适应值接收优化解, 也接受恶化解, 丰富种群的多样性, 从而避免过早收敛陷入局部, 有效地降低陷于局部的概率和初始种群的依赖性, 发挥粒子的认知能力和社会信息。

3 基于 PSO 的非线性 PID 控制器参数优化

控制系统的优化设计包括两个方面: 一个是控制系统参数的最优化问题, 即在系统结构确定的情况下选择适当的参数, 使系统的某些性能达到最佳; 另一方面是控制器结构最优问题, 即在系统控制对象确定的情况下选择适当的控制结构, 以使系统的某种性能达到最佳。文中所述属于参数最优化问题。通常采用工程整定或多次试凑法获得控制器参数, 但不能保证参数的最佳性, 文中采用粒子群算法优化整定非线性 PID 控制器参数, 其算法流程描述如下。

Step1: 初始化参数和种群。

根据非线性 PID 控制器的设计初始化算法的控制参数和初始种群, 如迭代计数器 n , 种群规模 m , 最大迭代次数 MaxStep , 性能指标 ε , 速度和位置的最大和最小值, 时变加速因子, 冷却温度等。将非线性 PID 控

制器的 9 个参数进行编码形成粒子群的个体, 令第 j 个粒子个体的位置为:

$$K_j(0) = [k_{p1}^j(0), k_{p2}^j(0), k_{p3}^j(0), k_{d1}^j(0), k_{d2}^j(0), k_{d3}^j(0), k_{d4}^j(0), k_{i1}^j(0), k_{i2}^j(0)]$$

式中, $K_j(0)$ 为待优化的控制器初始参数向量。为提高系统仿真速度, 缩小搜索空间, 各参数的确定可以 Z-N 法整定的结果为依据。同样, 初始化各微粒的速度。

Step2: 适应度函数评价。

根据参数优化旨在使控制偏差趋于零, 较快的响应速度和较小的超调量, 文中选择误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数, 同时为保证系统的平稳性和快速性, 在目标函数中考虑超调量和调整时间。因此目标函数为:

$$J = \int_0^{\infty} g_1 t |e(t)| dt + g_2 t_s + g_3 \delta \quad (8)$$

式中 g_1, g_2, g_3 为权值, 其大小根据系统需要调整的性能要求比重而确定。如强调平稳性, g_3 可取大一点。对初始种群进行适应度 J_j 的评价, 取每个粒子的初始最佳位置 $K_j^*(0) = K_j(0)$; 对应的个体最优目标值 $J_j^*(0) = J_j(0)$; 搜索群体中最佳适应度值 $J^{**}(0) = \min_j J_j^*(0)$ 。设对应于 $J^{**}(0)$ 的粒子索引号为 i , 则取对应的 $K_i(0)$ 为初始全局最佳微粒, 设全局最佳粒子位置为 $K^{**}(0)$, 则有

$$K^{**}(0) = [k_{p1}^i(0), k_{p2}^i(0), k_{p3}^i(0), k_{d1}^i(0), k_{d2}^i(0), k_{d3}^i(0), k_{d4}^i(0), k_{i1}^i(0), k_{i2}^i(0)]$$

Step3: 控制参数的更新。

令 $n = n + 1$, 完成惯性系数和加速因子的更新。

Step4: 粒子速度和位置更新。

利用全局最佳粒子位置 $P_g(n)$ 和个体最佳粒子信息 $P_i(n)$, 根据式(5)对每个粒子的速度进行更新, 利用式(6)进行各粒子位置的更新, 并进行限制为 V_{\max} 。

Step5: 个体最佳位置更新。

根据群体中所有粒子新的位置进行适应度 $J_j(n)$ 的评价计算, 假如 $J_j(n) < J_j(n-1)$, 则更新个体的最佳位置并记录相应的最佳适应度值和粒子索引号, $K_j^*(n) = K_j(n), J_j^*(n) = J_j(n)$, 否则保持粒子的原最佳位置不变, 即 $K_j^*(n) = K_j^*(n-1), J_j^*(n) = J_j^*(n-1)$ 。

Step6: 全局最佳位置更新。

在所有粒子个体最佳适应度值 $J_j^*(n)$ 中搜索最优的适应度值 $J_{\min}(n)$, 设 $J_{\min}(n) = J_h^*(n)$ 且索引号 h 不是前一轮迭代时的最佳粒子索引号, 则修改全局最佳位置, 并记录对应的全局最佳适应度值和新的全

局最佳粒子索引号 h , $K^{**}(n) = K_h^*(n)$, $J^{**}(n) = J_h^*(n)$, 否则保持原来的全局最佳粒子信息不变。

Step7:判断结束条件。
如果已达到最大迭代步数或最优目标条件,则返回当前最佳粒子的位置作为 PID 参数优化结果,算法结束;否则返回 Step2 继续下一循环的参数优化。

4 仿真研究

为验证粒子群算法所优化的非线性 PID 控制器的性能,选择典型二阶系统进行仿真研究,其传递函数为:

$$G(s) = 25/(s^2 + 20s + 25) \tag{9}$$

仿真参数选择如下:粒子种群 $m = 20$,最大迭代次数 $\text{MaxStep} = 100$,惯性系数 $\omega \in [0.1, 1.8]$,初始温度 $T = 70$,退火速度 $\alpha = 0.99$,参数范围依 Z-N 法整定值拓展搜索空间。

该系统的控制器增益参数 K_p, K_i, K_d 和误差的变化曲线如图 3 所示。分别采用传统的 Ziegler - Nichols 规则整定固定增益的传统 PID 控制参数为 $K_p = 5, K_i = 15, K_d = 0.5$;粒子群优化整定固定增益的线性 PID 控制参数为 $K_p = 6.5843, K_i = 17.6435, K_d = 0.0546$ 。基于粒子群优化的非线性 PID 控制器三种控制方式,其单位阶跃响应曲线如图 4 所示。文中方法优化整定的非线性 PID 控制器参数分别为:

$$\begin{aligned} k_{p1} &= 60.0268, k_{p2} = 8.8956, k_{p3} = 0.9264, \\ k_{d1} &= 15.2355, k_{d2} = 60.8324, k_{d3} = 80.7342, \\ k_{d4} &= 0.8564, k_{i1} = 10.8423, k_{i2} = 0.8645. \end{aligned}$$

三种控制方式下的仿真结果性能数据统计如表 1 所示。通过以上仿真可以看出,在响应时间、超调量等方面,文中采用的基于粒子群优化算法的非线性 PID 控制器都要优于其它方法整定得到的控制器。

表 1 PID 控制器性能指标

性能指标	Z-N	线性 PID	文中方法
超调量/%	20.82	18.64	0.05
上升时间/s	0.16	0.24	0.04
调节时间/s	0.78	0.86	0.06

5 结 论

结合粒子群算法提出一种非线性 PID 控制器参数整定的优化策略。非线性 PID 控制器的增益参数能够随着控制误差而变化,只要参数选择适当,因而该方法较线性 PID 控制器具有更好的动静态性能和抗干扰能力,既响应快,又无超调现象。粒子群算法具有简单快速和全局收敛的寻优特性,且对参数具有较强鲁棒性。仿真结果表明,采用粒子群算法整定优化获

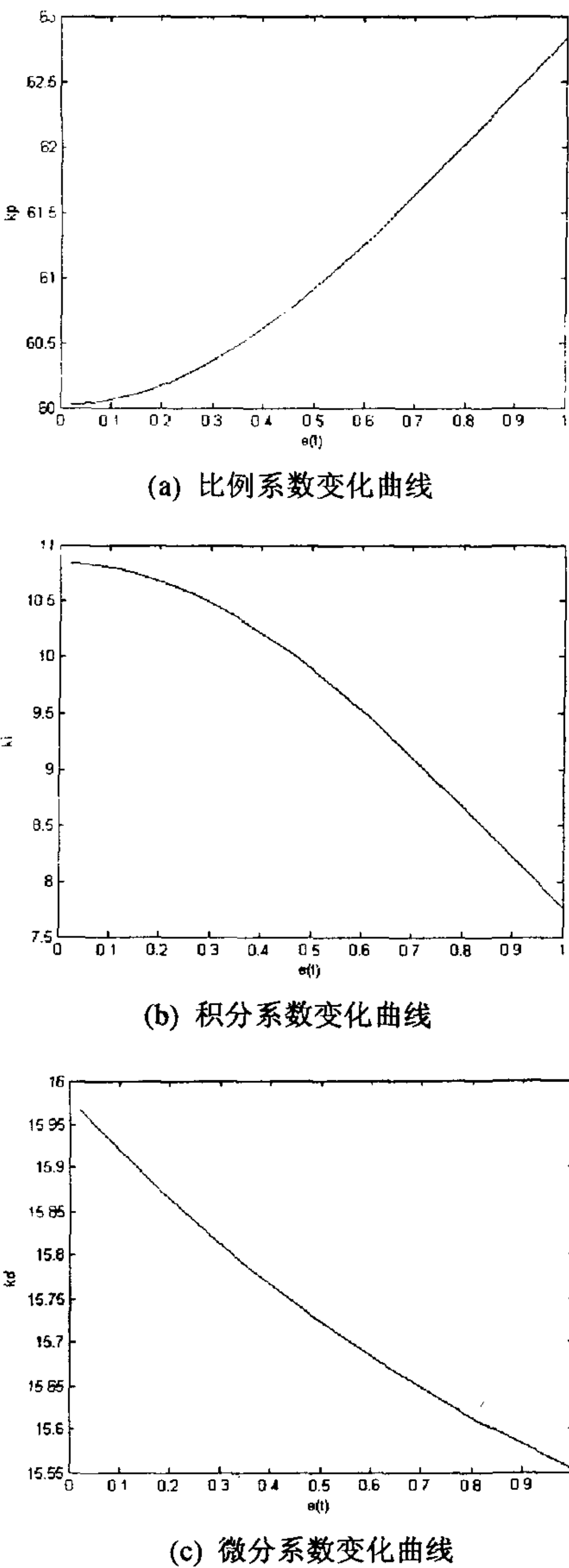


图 3 基于粒子群算法的非线性控制器的各增益与误差变化曲线

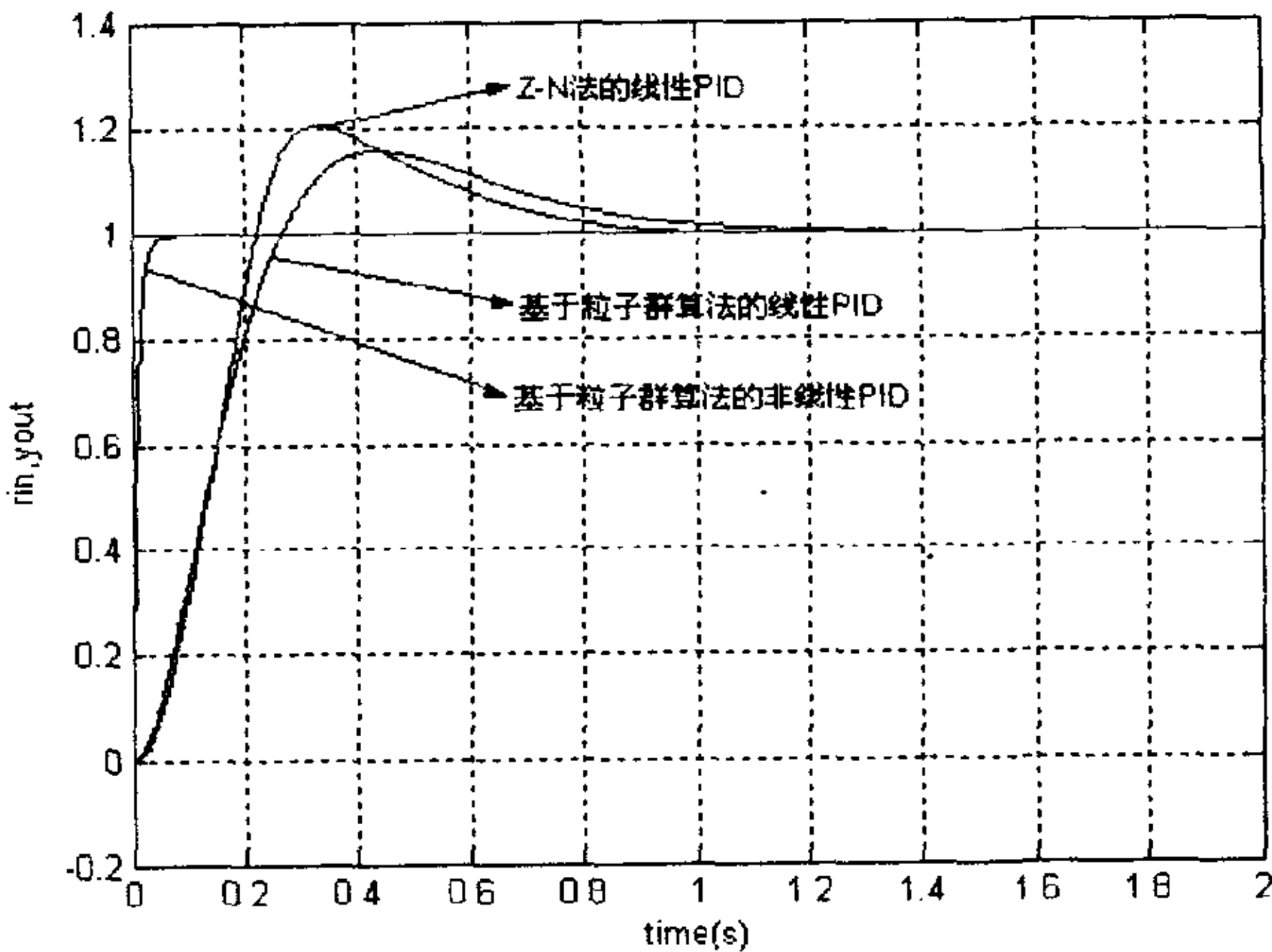


图 4 单位阶跃响应曲线

得非线性 PID 控制器的调节参数,使该控制器比传统的线性 PID 控制器和固定增益的线性 PID 控制器具
(下转第 79 页)

AH0003 既是客户又是供应商。

在此表的基础上,分别建立供应商视图 V-SUP 和客户视图 V-CUS:

```
CREATE VIEW V-SUP AS SELECT 往来户代码,名称,.....
FROM 往来户 WHERE 供应商='Y'
CREATE VIEW V-CUS AS SELECT 往来户代码,名称,.....
FROM 往来户 WHERE 客户='Y'
```

在应付科目核算时,从供应商视图 V-SUP 中选择核算对象,而应收科目核算则从客户视图 V-CUS 中选择核算对象。可见,该“往来户”表及其视图既可以满足业务活动数据处理的需要(满足业务系统对供应商代码和客户代码的分别需求),又能满足财务往来核算要求,保证了全系统内的数据一致性。

表 3 往来户代码一览表

往来户代码	名称	客户	供应商	地址
AH0001	公司 1	Y			
AH0002	公司 2		Y		
AH0003	公司 3	Y	Y		
.....					

总之,企业供应链业务系统与财务系统的广泛集成,使财务可以进行及时的账务处理,物流到哪里,会计核算流就到哪里,以货币化的形式及时反映企业实际供应链状态,跟踪每项业务的来龙去脉,使企业经营状况在财务数据中得到及时的反映,以利于加强对资金流的全局管理和控制,改善企业经营管理水平和应变能力,为管理者强化企业管理、调整经营活动提供了可靠的信息保障。

(上接第 74 页)

有更好的控制效果。

参考文献:

[1] 王 伟,张晶涛,柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报,2000,26(3):347-355.

[2] 顾勤龙,姚明海,张 芮. 基于变尺度混沌优化方法的 PID 控制器设计[J]. 控制工程,2003,10(2):149-152.

[3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[4] 苏玉鑫,段宝岩. 一种新型非线性 PID 控制器[J]. 控制与决策,2003,18(1):126-128.

[5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. New York, NY, USA: IEEE, 1995:1942-1948.

[6] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle

4 结束语

本方案通过 API 实现财务与业务信息的集成,支持公司会计核算和财务管理业务流程的改善,既可以通过预制记账凭证的形式,支持凭证的集中式审核,做到财务核算与业务活动信息处理分离,保证了财务核算的独立性,又可以使财务核算过程同步于业务过程,做到业务发生到哪里,财务就核算到哪儿,使企业资金流、业务流、信息流有效合一。财务信息来源于业务系统,及时准确地反映企业经营状态,又服务于业务活动,使业务活动在预算、资金计划内运行,以便决策者及时调整企业经营活动,适应激烈的市场竞争的需要,提高企业的竞争力。

参考文献:

[1] 李捷杨,周 南. 如何建立现代会计信息系统[J]. 会计研究,2004(4):30-34.

[2] 柴永欣,陆 雯. ERP 战略对传统企业财务管理的挑战[J]. 计算机工程与应用,2003(19):224-226.

[3] 钟 庆,刘德胜. 我国会计电算化的发展方向[J]. 重庆大学学报:社会科学版,2000,6(4):53-54.

[4] 钟 勇. MRPII/ERP 中财务管理系统设计[J]. 计算机应用,1998,18(5):25-27.

[5] 刘萍萍,申铨京,周求湛. 一种 ERP 环境下综合财务系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用,2004(28):214-217.

[6] 郝秀珍. 浅谈 ERP 系统中的财务管理信息系统[J]. 冶金财会,2002(9):42-43.

[7] 钱艳俊,张正祥,林 军. 基于供应链的 ERP 实施模式研究[J]. 情报学报,2003,22(2):217-221.

swarm theory[C]//Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Micro Machine and Human Science. New York, NY, USA: IEEE, 1995:39-43.

[7] 陈国初,俞金寿. 微粒群优化算法[J]. 信息与控制,2005,34(3):318-324.

[8] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. New York, NY, USA: IEEE, 1998:69-73.

[9] El-Gallad A, El-Hawary M, Kalas A. Enhancing the particle swarm optimiser via proper parameters selection [C]// IEEE CCECE02 Proceedings. Piscataway, NJ, Canada: IEEE service center, 2002:792-797.

[10] 高 尚,杨 静,吴小俊,等. 基于模拟退火算法思想的粒子群优化算法[J]. 计算机应用与软件,2005,22(1):103-105.