

一种新型鲁棒 PID 控制器参数整定方法

徐志成

(常州工程职业技术学院 机械与电子工程系, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对复杂工业过程中存在的一类模型不确定问题, 提出了一种新的鲁棒比例积分微分 (PID) 控制器参数整定方法。通过对优化目标的分析, 将鲁棒 PID 控制器的参数整定问题转化为一个求解最小-最大优化问题, 并引入合作进化粒子群优化算法对该最小-最大优化问题进行求解。针对实例的仿真结果表明, 利用该方法整定得到的鲁棒 PID 控制器具有良好的鲁棒性, 提高了性能指标, 当过程对象操作范围发生大的变化时, 该控制器能获得满意的结果。

关键词: 粒子群优化; 最小-最大原理; PID 控制器; 参数整定

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)07-0022-04

0 引言

在工业过程控制中, 基于偏差的比例 (Proportional)、积分 (Integral)、微分 (Derivative) 进行控制的 PID 控制因为原理简单、易于实现、适用面较宽等优点, 一直都是最通用的控制方法。PID 控制器性能的好坏与对其参数的整定有很大关系, 文献[1-4]提供了关于 PID 控制器参数整定的几种代表性方法, 如 Ziegler-Nichols 法 (简称 Z-N 法)、Cohen-Coon 响应曲线法、基于平方误差积分 ISE (Integral Squared Error) 准则和时间乘平方误差积分 ISTE (Integral Squared Time Error) 准则最优整定法。对于某一特定过程对象, 常规 PID 参数整定易产生一组控制器参数, 使控制器具备满意的控制效果。

但随着过程对象的变化, 如元器件参数漂移、处理量变化、环境条件变化等, 常规 PID 参数整定出的参数往往不能再保持满意的控制效果, 甚至会出现振荡或发散现象。鲁棒 PID 控制器正是为了克服常规 PID 控制器的这一缺陷而产生的, 其主要思路是寻找一组合理的 PID 控制器参数, 使控制器的性能对于模型的不确定性不敏感, 并且当模型在一定的变化范围内时能保证控制器具有良好的控制性能。粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法^[5-9]来源于对群体智能的模拟, 属于随机优化算法, 现在已在函数优化、神经网络训练、模式识别等领域得到广泛的研究。

本文在最小-最大原理基础上, 利用 PSO 算法的强大寻优能力对鲁棒 PID 控制器参数进行整定。对典型问题仿真表明, 用 PSO 算法整定的鲁棒 PID 控制器具有良好的鲁棒性和满意的控制效果。

1 鲁棒 PID 控制器

鲁棒 PID 控制器的参数整定方法是为了解决过程模型在一定范围内动态变化的实际问题而设计

的。采用基于最小-最大原理的鲁棒 PID 控制器, 也就是寻找一组 PID 控制器参数, 使过程对象即使在最恶劣的工况下也能保持可接受的控制品质, 即控制器的性能对过程对象的不确定性不敏感。

PID 控制器的表示形式如下:

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (1)$$

式中 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 控制器的比例、积分、微分系数; s 为拉氏算子。

对系统控制性能指标判据有很多种, 比如 ISE、绝对误差积分 IAE (Integral Absolute Error)、时间乘绝对误差积分 ITAE (Integral Time Absolute Error) 等, 不同的性能指标对于控制器品质的侧重点不同, 如上升时间、超调量等, 也就直接影响着整定后 PID 参数的整定值。但这对鲁棒 PID 的设计没有本质上的影响。这里选取 ISE 判据。

过程对象模型如式(2)所示:

$$G_p = K e^{-\tau s} / \prod_{i=1}^n (T_i s + 1) \quad (2)$$

鲁棒 PID 控制器参数整定的目标函数为

$$\min_{P_c} \max_{P_m} \text{ISE}(P_c, P_m) \quad (3)$$

式中 $P_c = (K_p, K_i, K_d)$ 为 PID 控制器的参数; $P_m = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 为过程对象模型的参数。

也就是说, 鲁棒 PID 控制器试图在最坏的工业情况下寻找最佳的控制性能。从整定目标可以看出, 求最优优化目标函数是个求最小-最大的问题, 需要在内层求最大和外层求最小, 并且需要在两者之间进行协调, 最终才能求得在最小和最大之间满意的解。常规的算法往往会在最小和最大之间出现振荡而无法收敛, 应用 PSO 算法则能克服上述缺点。

2 PSO 算法

2.1 基本 PSO 算法原理^[5-10]

PSO 优化算法与其他进化算法相类似, 也是将寻优的参数组合成群体, 通过对环境的适应度将群

体中的个体向好的区域移动。与其他进化算法不同的是,在描述个体时,将其看成是 D 维寻优搜索空间的一个没有体积的微粒(点)^[11-12],结合微粒的历史最佳位置和群体历史中最优微粒的最佳位置信息,以一定的速度向目标值逼近。

设第 i 个微粒的位置为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 其速度为 $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。该微粒所经历的历史最好位置记为 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, 也称为 $\mathbf{P}_{\text{best}}$, 记全体所有微粒经过的最好位置为 $\mathbf{G}_{\text{best}} = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iD})$ 。按追随当前最优微粒的原理,对第 t 代的第 i 个微粒,PSO 算法根据式(4)(5)计算第 $t+1$ 代的第 j 维的速度和位置^[6,8-9]。

$$v_{ij}^{t+1} = \delta v_{ij}^t + c_1 r_1^t (p_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 r_2^t (g_{ij}^t - x_{ij}^t) \quad (4)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (5)$$

式中 δ 为惯性权重,它使微粒保持运动惯性,使其具有扩展搜索空间的趋势,有助于新区域的搜索; r_1^t, r_2^t 为 $[0, 1]$ 的随机数; c_1, c_2 为加速度常数,表示将每个微粒推向 $\mathbf{P}_{\text{best}}$ 和 $\mathbf{G}_{\text{best}}$ 的统计加速度权重,两者均为正值。

此外,微粒的速度 $\mathbf{v}_i$ 被一个最大速度所限制。如果当前对微粒的加速导致它在某维的速度 v_{ij} 超过该维的最大速度 $v_{\max, j}$, 则该维的速度被限制为最大速度 $v_{\max, j}$ 。

2.2 基本 PSO 算法流程

下面描述 PSO 算法实现流程。

步骤 1 根据具体问题,设置有关参数,如确定群体规模 m , 惯性权重 δ , 搜索空间维数 D , 加速度常数 c_1, c_2 , 算法终止的条件等。

步骤 2 初始化群体的速度和位置,并且根据目标函数计算微粒的适应度。

步骤 3 对每个微粒,将其适应值与其经历过的最好位置 $\mathbf{P}_{\text{best}}$ 作比较,如果较好,则将其作为当前的最好位置 $\mathbf{P}_{\text{best}}$, 否则继续执行下一步。

步骤 4 对每个微粒,将其适应值与全局所经历的最好位置 $\mathbf{G}_{\text{best}}$ 作比较,如果较好,则将其作为当前全局的最好位置 $\mathbf{G}_{\text{best}}$, 否则继续执行下一步。

步骤 5 根据式(4)(5)更新微粒的速度和位置。

步骤 6 判断算法是否满足终止条件。若达到终止条件,则算法停止,返回当前最优微粒的结果;否则,返回步骤 2,继续下一循环。

2.3 合作进化 PSO 算法^[13]

文献[13]提出了一种合作进化(co-evolutionary)的 PSO 算法,主要解决最小-最大问题。本文结合文献中的合作进化思想,提出了一种用 PSO 算法解决鲁棒 PID 控制器问题的方法——基于合作进化思想的 PSO 算法,以下简称为合作进化 PSO 算法。

假设在空间中,存在一有 n 个微粒的微粒群,记为 X_s , 对于群中的每一个微粒,均有与其相对应的一个含有 m 个微粒的微粒群,记为 $Y_s^k, k(k=1, 2, \dots, n)$ 表示第 k 个微粒所对应的微粒群。微粒群 X_s 和

微粒群 Y_s^k 均具有各自的种群数、初始速度、初始位置等,两者不相关。下面描述用合作进化 PSO 算法整定鲁棒 PID 控制器参数的方法基本算法流程。

步骤 1 分别设置微粒群 X_s 和微粒群 Y_s^k 的各自参数,如群体规模 P_{op}^x 和 P_{op}^y 、进化代数 G_{en}^x 和 G_{en}^y 、加速度常数 c_1 和 c_2 等。

步骤 2 初始化微粒群 X_s 。

步骤 3 对于微粒群 X_s 中的每一个微粒,执行下述步骤 4~6。

步骤 4 对于微粒群 X_s 中的第 k 个微粒,初始化微粒群 Y_s^k 。

步骤 5 计算目标函数值,即式(3)中的 $\text{ISE}(P_e, P_m)$ 。在此计算过程中,将微粒群 X_s 中的第 k 个微粒的值作为常值,根据基本 PSO 算法流程,利用方程(4)进化微粒群 Y_s^k , 得到第 k 个微粒所对应的最优目标函数值。进化微粒群 Y_s^k 的终止条件是达到进化代数 G_{en}^y 。

步骤 6 上述步骤 5 的结果是得到式(3)所对应的内层最大值。返回步骤 5 的结果。

步骤 7 根据步骤 3~6 返回的微粒群 A_s 中 n 个微粒的位置值及其对应的目标函数值的大小,通过比较寻找出对应最大目标函数值的最优微粒位置值。判断微粒群 X_s 进化是否已达到终止条件,如果达到,则停止算法的执行并返回最优微粒的位置值,即所要寻找的一组 PID 控制器参数值;否则,依据式(4)(5),对微粒群 X_s 进化一代,重复执行步骤 4~7。

3 仿真研究

通常的工业对象都具有非线性、时变等特性,在过程控制中,常被近似为一阶或二阶典型工业过程。本文针对一个直流电机对象进行仿真研究。直流电机的原理图如图 1 所示。

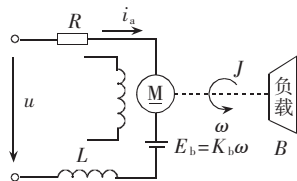


图 1 直流电机原理图
Fig.1 Principle diagram of DC motor

根据电路原理,列出直流电机的电枢回路平衡方程如下:

$$u(t) = L \frac{di_a}{dt} + R i_a + K_b \omega \quad (6)$$

式中 $u(t)$ 为电机的输入电压; L 为电枢电路总电感; i_a 为电枢电流; R 为电枢回路总电阻; K_b 为反电势系数; ω 为电机转子角速度。

根据刚体旋转定律,列出直流电机的运动方程如下:

$$J \frac{d\omega}{dt} + b \omega + T_l = K i_a \quad (7)$$

式中 J 为电机和负载折合到电机轴上的转动惯量; b 为电机和负载折合到电机轴上的粘性摩擦系数; T_l 为负载转矩; K 为电机的转矩常数。

采用文献[14]中的数据进行计算。

为简化算式,假定负载转矩 $T_l=0$ (实际应用中,若负载转矩不为零,可通过线性变换将其变换为输入电压 u 的一个偏移量)。并令 $\mathbf{x}=\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix}$,将上述两式转换为状态空间表示为如下式(8)(9)所示,并将文献[14]中参数值代入,求得直流电机的传递函数如式(10)所示。

$$\dot{\mathbf{x}}=\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix}\mathbf{x}+\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}u \tag{8}$$

$$y=\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}\mathbf{x} \tag{9}$$

$$G_M(s)=\mathbf{C}(s\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}=\frac{250\ 700}{s^2+2\ 261s+63\ 290}=\frac{250\ 700}{(s+2\ 233)(s+28.35)} \tag{10}$$

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}=\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

仿真过程中,设定值为单位阶跃函数,微粒群 X_s 和微粒群 Y_s^k 的群体规模均为 30,进化代数均为 50,两者进化终止条件是进化代数达到 G_{en}^* 和 G_{en}^* ,加速度常数 $c_1=c_2=0.5$,惯性权重 δ 随着寻优次数的增加从 1.2 线性变化到 0.1,采样周期为 0.01 s。为了比较,本文也利用遗传算法(GA),采用与 PSO 算法相同的算法设计对该直流电机对象进行控制。遗传算法的各参数选择为:2 个种群数均为 30,进化代数均为 50,两者进化终止条件是进化代数达到 50 次,每个参数的二进制编码为 16 位,交换概率为 0.5,变异概率为 0.1,迁移概率为 0.1。

在不确定度为 40 % 时的整定结果如表 1 所示。正常情况下和最坏情况下各种整定方法得到的单位阶跃响应曲线分别见图 2、3,图中 n 表示直流电机的转速,是系统的被控制量。

从表 1 中的整定结果和图 2、3 可以看出,正常情况下,作为传统整定方法的代表,Z-N 法和 ISE 最优整定法所得到的控制器的性能尚可,但当最坏工

表 1 对直流电机对象的 PID 参数整定结果

Tab.1 Tuned parameters of PID controller for DC motor

整定方法	PID 控制器参数			正常情况下 ISE 值(10 s 内)	最差情况下 ISE 值(10 s 内)
	K_p	K_i	K_d		
Z-N 法整定普通 PID	1.23	34.20	0.53	18.53	98.515
ISE 指标最优整定普通 PID	1.88	14.01	1.23	25.98	112.05
GA 整定鲁棒 PID	0.79	7.36	1.89	3.52	13.25
PSO 算法整定鲁棒 PID	0.60	10.53	1.95	2.01	8.23

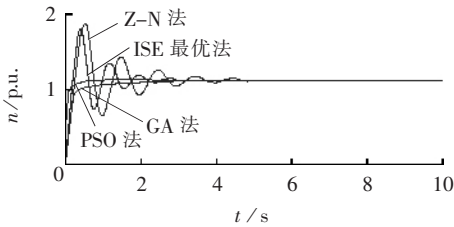


图 2 直流电机对象在正常情况下的单位阶跃响应曲线

Fig.2 Unit step response of DC motor in normal condition

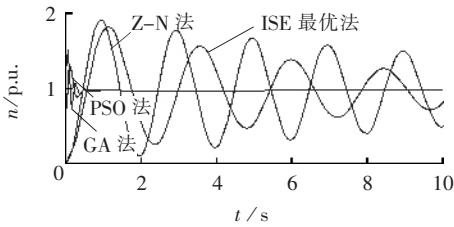


图 3 直流电机对象在最差情况下的单位阶跃响应曲线

Fig.3 Unit step response of DC motor in worst condition

业情况出现时,控制器并不能保证系统有满意的效果,突出的表现是性能指标值的增加,用本文提出的合作进化 PSO 算法整定得到的鲁棒 PID 控制器,虽然在出现最坏工业情况时,性能指标也有少许增加,但与 Z-N 法和 ISE 最优法方法相比而言,显然可以忽略不计。与遗传算法相比,PSO 算法也具有一定的优势。因此,用 PSO 算法整定得到的鲁棒 PID 控制器当过程对象在一定范围内发生变化时,仍然可以获得满意的控制效果。

4 结论

本文在基于最小-最大原理的基础上,利用合作进化 PSO 算法对鲁棒 PID 控制器的参数整定进行了尝试,并获取了满意的结果。但是必须看到,当过程对象的不确定度超过了一定的界限时,整定出的鲁棒 PID 控制器对过程对象的控制可能得不到满意的效果,甚至会出现振荡。但是总体而言,本文提出的用合作进化 PSO 算法整定鲁棒 PID 控制器不失为一种对鲁棒 PID 控制器进行整定的实用新方法。

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.
WANG Wei,ZHANG Jing-tao,CHAI Tian-you. A survey of advanced PID parameter tuning methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2000,26(3):347-355.
[2] ZIEGLER J G,NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers[C] // IEEE Trans on ASME. New York:IEEE Press, 1942:433-444.
[3] COHEN G D,COON G A. Theoretical consideration of retarded controllers[C] // IEEE Trans on ASME. New York:IEEE Press, 1953:827-834.
[4] ZHANG M X,ATHERTON D P. Automatic tuning of optimum PID controllers[C] // IEEE Proc Control Theory Application. London:

IEEE Press,1993;216-224.

[5] KENNEDY J,EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // Proc IEEE Int Conf on Neural Networks. Perth:IEEE Press, 1995; 1942-1948.

[6] SHI Yu - hui,EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]// Proc IEEE Int Conf on Evolutionary Computation. Anchorage: IEEE Press, 1998;69-73.

[7] EBERHART R,KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proc 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya:IEEE Press, 1995;39-43.

[8] SHI Yu - hui,EBERHART R. Parameter selection in particle swarm optimization[C] // Proc of the 7 th Annual Conf on Evolutionary Programming. Washington:IEEE Press, 1998;591-600.

[9] SHI Yu - hui,EBERHART R. Empirical study of particle swarm optimization[C] // Proc of the Congress on Evolutionary Compu-tation. Washington:IEEE Press, 1998;1945-1950.

[10] 谢晓峰,张文俊,杨之廉. 粒子群算法综述[J]. 控制与决策, 2003,18(2):129-134.

XIE Xiao - feng,ZHANG Wen - jun,YANG Zhi - lian. Overview of particle swarm optimization[J]. Control and Decision,2003,18 (2):129-134.

[11] MILLONAS M M. Swarms phase transition and collective intelli - gence[M]. Miami:Addison Wesley,1994.

[12] KENNEDY J,EBERHART R,SHI Yu - hui. Swarm intelligence [M]. San Francisco:Morgan Kaufmann,2001.

[13] SHI Yu - hui,KROHLING R K. Co - evolutionary particle swarm optimization[C] // Proc of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. Hawaii:IEEE Press, 2002;1682-1687.

[14] ALMUTAIRI N B. Adaptive fuzzy modulation for networked PI control system[M]. North Carolina State,USA :North Carolina State University Press,2002.

(责任编辑：康鲁豫)

作者简介：
徐志成(1980-),男,江苏东台人,硕士研究生,从事智能优化和鲁棒控制等方面的研究(E-mail:zcxu@iipc.zju.edu.cn)。

Parameter tuning of robust PID controller

XU Zhi-cheng

(Changzhou Institute of Engineering Technology,Changzhou 213164,China)

Abstract: Aiming at uncertainties of the model in complex industry processes,a method of parameter tuning for robust PID(Proportional-Integral-Derivative) controller is presented. Based on the analysis of optimization objective,the parameter tuning of the robust PID controller is converted into the minimum -maximum optimization ,for which a co-evolutionary algorithm based on the PSO (Particle Swarm Optimization) is introduced to get its solution. Case simulations show that the PID controller tuned by the method has better robustness and improved performance during wide operational range change of process.

Key words: particle swarm optimization; minimum-maximum; PID controller; parameter tuning

.....