



多目标粒子群优化算法在 PID 优化设计中的应用

周刘喜,陈育中,嵇朋朋

(江苏联合职业技术学院南京分院 电气工程系,江苏 南京 210019)

摘 要: 为了克服 PID 控制器参数整定时适应度函数权重难以选择的问题,提出一种多目标粒子群优化算法。该算法不需要设置权重参数,采用精英归档策略,按照 Pareto 最优原则,对控制系统阶跃响应的超调量和上升时间两项指标进行优化,从而实现 PID 控制器参数的自动整定。仿真结果表明,该算法可以获得大量优质 Pareto 最优解,解的质量优于其它方法。

关键词: PID; 多目标优化; Pareto 最优; 粒子群算法; 精英存档

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2019) 06-0090-05

90

武汉职业技术学院学报二〇一九年第十八卷第六期(总第一百零四期)

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,由于其结构简单、鲁棒性强、可靠性高,因而在工业过程控制中得到了广泛的应用,PID 控制器的参数整定成为自动控制领域一个重要的研究课题。Ziegler 和 Nichols 提出了经典的 PID 参数整定方法^[1],受到了广泛关注。但是,Z-N 法存在着超调量过大、响应时间长等问题,控制性能指标不理想。近年来,随着智能优化算法的兴起,遗传算法^[2]、粒子群算法^[3]、蚁群算法^[4]、差分进化算法^[5]等纷纷被用于 PID 参数优化设计,取得了良好的效果。此类方法通常对累积误差、超调量、上升时间、调节时间等指标进行加权求和来构造适应度评价函数,权重大小的设置需要很强的经验知识,不易获得。

粒子群优化算法是由 Kennedy 和 Eberhart 提出的一种群智能优化计算方法^[6]。该算法原理简单、实

现方便,已经在许多优化问题中得到了成功的应用。本文按照 Pareto 最优原则提出一种多目标粒子群优化算法(Multi-objective Particle Swarm Optimization, MOPSO),对超调量和上升时间两项指标进行优化,该算法采用精英归档策略,每个粒子的个体最优位置按照 Pareto 支配关系进行更新,所有粒子的全体最优位置从档案库中选取。该方法不需要加权重,可以获得大量优质的 Pareto 最优解,决策者可以根据具体需求选取符合要求的满意解。

一、多目标粒子群优化算法

(一)多目标极小化问题^[7]:

$$\min F(\mathbf{X}) = \{f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_m(\mathbf{X})\} \\ \mathbf{X} \in S \subset \mathbf{R}^n \quad (1)$$

式中, $S \subset \mathbf{R}^n$ 称为可行解域, $\mathbf{E} = \{F(\mathbf{X}) | \mathbf{X} \in \mathbf{R}^n\}$

收稿日期:2019-09-09

基金项目: 全国高等院校计算机基础教育研究会计算机基础教育教学研究项目“大数据时代综合课程数字化教学资源建设与研究——以《机器人技术应用(ABB)》课程为例”(项目编号:2019-AFCEC-218);第四期江苏省职业教育教学改革研究重点课题“互联网+”时代综合课程数字化教学资源开发与实践——以《工业机器人技术应用》课程为例”(项目编号:ZZZ6);南京市“十三五”教育科学规划课题“建筑智能化综合创新实训基地的研究与实践”(项目编号:L/2016/031)。

作者简介: 周刘喜(1979-),男,河南获嘉人,南京高等职业技术学校讲师,研究方向:智能优化算法、职业教育教学;陈育中(1981-),男,江苏盐城人,南京高等职业技术学校高级讲师,研究方向:传感器与检测技术、高职教育;嵇朋朋(1988-),男,江苏淮安人,南京高等职业技术学校讲师,研究方向:电气自动化、职业教育课程与教学。

称为目标解向量空间。

定义1 Pareto 支配:称一个向量 $u=(u_1, u_2, \dots, u_m)$ 支配(或非劣于) $v=(v_1, v_2, \dots, v_m)$ 向量,当且仅当对于 $\forall i \in (1, 2, \dots, m)$, $u_i \leq v_i \wedge \exists i \in (1, 2, \dots, m)$ 使得 $u_i < v_i$, 记为 $u < v$ 。

定义2 Pareto 最优:一个解 X^* 称为多目标优化问题的 Pareto 最优解,当且仅当不存在 $X \in S$ 使得 $F(X) < F(X^*)$ 。

定义3 Pareto 最优集:所有 Pareto 最优解的组成的集合称为 Pareto 最优集,记为

$$P_s = \{X \in S \mid \nexists X' \in S \forall F(X') < F(X)\} \quad (2)$$

定义4 Pareto 前端(Pareto Front):所有 Pareto 最优解对应的目标函数值所形成的区域称为 Pareto 前端,表示为

$$P_F = \{F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)) \mid X \in P_s\} \quad (3)$$

(二)粒子群优化算法

在基本的粒子群优化算法中,每个粒子表示优化问题的一个潜在解,并附带一个速度使得粒子可以在整个可行解空间上“飞行”,粒子根据自己和同伴的“飞行”经验来调整自己的飞行方向^[8]。设待优化的目标函数为 $f(X)$,可行解 X 的维数为 D ,粒子群算法的群体规模为 M 。用 $X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t)$ 来表示群体中的一个粒子, t 表示种群的当前进化代数,用

$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$ 表示粒子 i 的当前速度;粒子 i 自身经历过的最好位置称为个体极值,记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$;整个种群经历过的最好位置称为全体极值,记为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。在算法迭代过程中,粒子始终“追踪”个体极值和全体极值来调整自己的速度和位置,从而实现群体的进化^[9]。粒子速度和位置更新公式如下:

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1r_1(p_{id} - x_{id}^t) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}^t) \quad (4)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}, (1 \leq i \leq M, 1 \leq d \leq D) \quad (5)$$

其中, w 称为惯性权重,通常取 0.9~0.4 线性递减值; c_1 、 c_2 称为加速因子,通常取 $c_1=c_2=2$; r_1 、 r_2 为(0,1)之间的随机数。

(三)优化指标选择

自动控制系统的性能通常从稳定性、快速性和准确性三个方面进行评价。三个指标之间常常相互矛盾。稳定性能好,快速性就会变差,反之亦然。PID 控制器优化的目的就是调整参数,使得系统能够既快又稳。本文选择阶跃响应的超调量 $\sigma\%$ 和上升时间 t_r 作为优化指标, t_r 定义为输出响应从 0.1~0.9 y_{ref} 所用时间。

(四)精英归档策略

多目标粒子群算法中,根据粒子对应的目标向量受支配的程度来确定粒子的优劣程度。为了衡量每个粒子对应的目标向量的受支配程度,采用粒子

的序值进行度量^[9]。如第 t 代种群的 X_i 个体的目标向量被种群中的 p_i^t 个个体的目标向量所支配,那么个体 X_i 的序值 $rank(X_i, t) = 1 + p_i^t$,所有支配个体的序值被指定为 1。序值越小,粒子受支配程度越小,粒子的目标向量越好;序值越大,粒子受支配程度越大,粒子的目标向量越差。在种群外部设置一个档案库,将当前种群中所有序值为 1 的个体作为精英个体保存到外部档案库中。如果当前群体中没有序值为 1 的个体,则将序值较小的个体作为精英个体存到档案库,称这种操作为精英归档^[7]。

(五)全体极值与个体极值的选取

多目标粒子群算法采用了精英归档技术,在种群外存在一个档案库用于保存算法进化过程中产生的非劣解。粒子速度更新时所需的全体极值直接从外部档案库中随机选取。对于个体极值的选择,基于 Pareto 最优概念,在粒子的当前位置和历史最优位置中选择一个非劣解作为粒子的个体极值,如果二者无支配关系则保持个体最优值不变^[7]。

(六)多目标粒子群算法流程

本文多目标粒子群算法(MOPSO)的实现步骤如下^[7]:

Step1:初始化,给定多目标粒子群算法的控制参数;迭代次数,群体规模;

Step2:计算每个粒子所代表目标值;

Step3:根据 Pareto 最优概念更新每个粒子的个体极值;

Step4:根据 Pareto 最优概念挑选当前种群中的非劣解存入外部档案库,同时按 Pareto 最优更新档案库;

Step5:更新种群中每个粒子的速度和位置;

Step6:判断最大迭代次数是否达到?若达到,则输出档案库中的所有非劣解;否则,转到 Step2。

二、PID 控制系统模型

基本的 PID 控制系统结构如图 1 所示^[10]:

其中, G_c 表示 PID 控制器的传递函数, G_p 表示

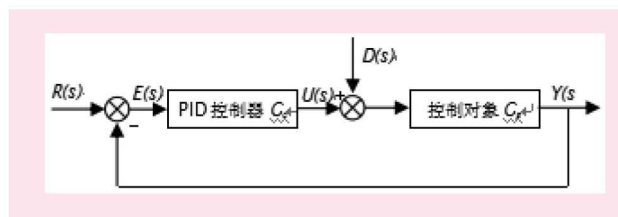


图1 PID 控制系统框图

被控对象的传递函数, $R(s)$ 为系统的输入, $Y(s)$ 为系统的输出, $E(s)$ 为输入输出之间的误差, $U(s)$ 为控制器输出, $D(s)$ 为扰动。PID 控制器的传递函数可以表示为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6)$$

实际工程中常用一阶惯性微分环节替代纯微分环节,这样PID控制器的传递函数变为

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_d s / N}) \quad (7)$$

其中, K_p 、 T_i 和 T_d 分别表示比例、积分和微分时间常数, N 是一个较大的常数(本文取 $N=10$)。PID参数优化整定就是要在 K_p 、 T_i 、 T_d 的可行解空间内找到一组参数,在满足系统稳定性的前提下,使得控制系统的某种性能指标最优^[10]。

PID控制器中,待优化的参数为 K_p 、 T_i 和 T_d ,MOPSO算法采用浮点数编码,可以直接将 (K_p, T_i, T_d) 作为一个个体矢量。MOPSO算法的搜索空间以Ziegler-Nichols(Z-N)法获得的参数结果为中心,向两边进行延拓,这样既可以充分利用ZN法的合理内核,又缩小了实际参数的搜索空间^[10]。

$$\begin{cases} \alpha K_p^* \leq K_p \leq \beta K_p^* \\ \alpha T_i^* \leq T_i \leq \beta T_i^* \\ \alpha T_d^* \leq T_d \leq \beta T_d^* \end{cases} \quad (8)$$

其中, K_p^*, T_i^*, T_d^* 为Z-N法整定值, α, β 为延拓系数,本文取 $\alpha=0.3, \beta=5$ 。

三、仿真结果及分析

为了验证所提方法的有效性,用MOPSO算法对以下两类被控对象的PID控制器进行参数优化设计^[11]。

对象1:三阶线性系统

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{(s+0.1)(s+0.2)(s+0.7)} \quad (9)$$

对象二:时滞系统

$$G_{p2}(s) = \frac{0.75e^{-8.067s}}{(1+61.45s)^2} \quad (10)$$

MOPSO法中,群体规模 M 为50,最大迭代次数 T 为200,惯性权重从0.9到0.2线性递减,加速因子 $c1=0, c2=2$,外部精英库规模为30。由于多目标粒子群算法中,全局最优解是一个Pareto解集,不是单个解,将加速因子 $c1$ 取0,不影响种群的多样性,还可以加速算法的收敛速度。采用Matlab进行编程仿真。为了获得更多的Pareto最优解,将每个对象算法各运行20次。

表1、表2列出了不同方法整定的PID控制器

表1 对象1不同方法整定的PID参数及其性能指标

PID整定方法	Kp	Ti	Td	超调量%	上升时间 tr	调节时间 ts
Z-N	15.5483	52.0028	13.0007	55.8	14.6	193
ISE	10.7434	218.3613	16.4026	17.6	20.3	273
ISTE	10.6819	262.5147	12.3962	21.6	23.1	361
PSO	6.5129	114.5398	38.4965	2.82	19.8	112
MOPSO	6.4202	105.6956	35.4628	1.22	21.9	94.5
MOPSO	6.4364	105.6956	35.5152	1.70	21.2	98.1
MOPSO	6.4302	105.6954	37.6878	2.22	20.5	101.1
MOPSO	6.3902	105.6949	38.9296	2.62	20.1	103.7
MOPSO	6.4111	105.6958	39.0692	2.86	19.9	103.7

表2 对象2不同方法整定的PID参数及其性能指标

PID整定方法	Kp	Ti	Td	超调量%	上升时间 tr	调节时间 ts
Z-N	0.1581	6.8211	1.7053	52.3	2.46	30.6
ISE	0.1096	27.7732	2.1438	18.1	3.25	35.3
ISTE	0.1090	33.3812	1.6211	21.6	3.53	48.3
PSO	0.0672	16.1509	3.9509	2.38	3.85	17.3
MOPSO	0.0617	14.2719	5.1636	1.00	3.54	16.9
MOPSO	0.0630	14.4028	5.1222	1.59	3.47	16.8
MOPSO	0.0598	12.8188	5.6860	1.65	3.42	16.0
MOPSO	0.0628	13.9382	5.3807	2.17	3.37	16.5
MOPSO	0.0613	13.3797	5.6929	2.21	3.33	16.4

参数及其性能指标,对于MOPSO算法给了5组Pareto最优解,其中,调整时间 t_s 表示稳态误差小于0.02 y_{ref} 过渡时间。图2、图3给出了MOPSO算法获得的超调量和上升时间两项指标的Pareto最优前端,Pareto前端只取了超调量0~30%的部分。图4、图5给出了不同方法获得的单位阶跃响应曲线。

从表1中可以看出,对于对象1,MOPSO方法所

获得的Pareto解在超调量、上升时间、调节时间三项指标上均优于其它方法。从表2中可以看出,对于对象2,MOPSO方法所获得的Pareto解在超调量、上升时间、调节时间三项指标上优于Z-N、ISE、ISTE三种方法;与PSO算法相比较,上升时间略长,但是超调量和调整时间均优于PSO算法。从图2、3可以看出MOPSO所获得的超调量和上升时间两项指标的

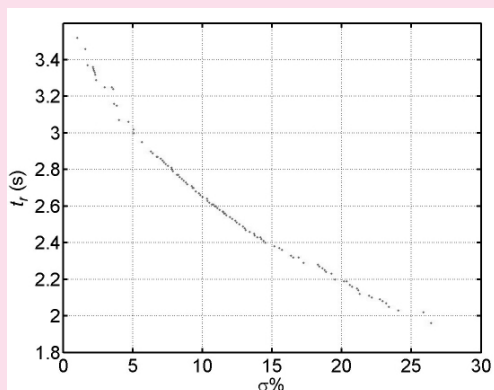


图2 对象1的Pareto最优解前端

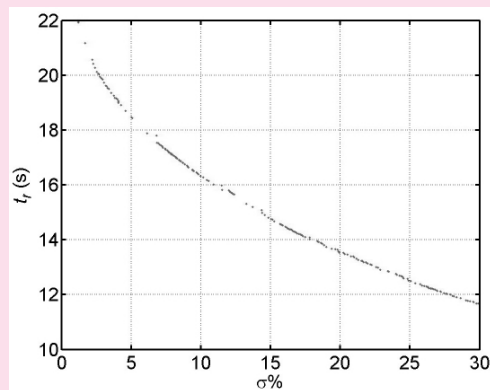


图3 对象2的Pareto最优解前端

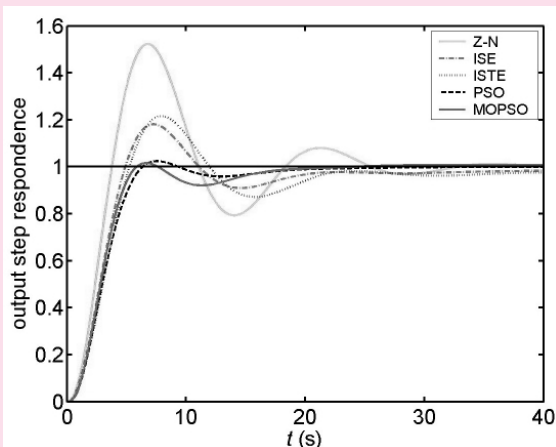


图4 对象1不同方法获得的单位阶跃响应曲线

Pareto前端基本均匀,二者成反比变化,符合基本控制规律。从图4、5可以看出Z-N法获得阶跃响应曲线超调量最大,上升时间最短,但是调节时间最长,动态性能最差。MOPSO算法获得超调量最小,调整时间最短,动态性能最好。综合比较MOPSO算法性能最优。

四、结论

本文的多目标粒子群算法按照Pareto最优原则,对超调量和上升时间两项指标进行优化,采用了精英归档策略,有效地避免PID参数整定时适应度权重难以选择的问题。多目标粒子群算法可以获得

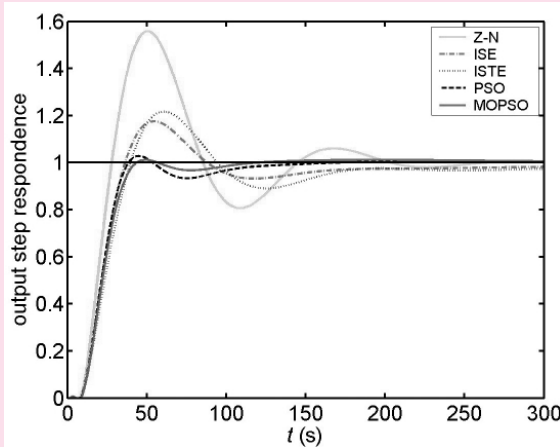


图5 对象2不同方法获得的单位阶跃响应曲线

大量优质Pareto解,技术人员可以根据需求进行选择。本文为PID控制器参数优化设计提供了一种有效方法。

参考文献:

- [1] Ziegler J G, Nichols N B, Rochister N Y. Optimum settings for automatic controllers [J]. Transactions of the ASME, 1942, (64):759-768.
- [2] 周勇,邓仕英. 基于改进遗传算法的PID参数优化在闪蒸罐压力控制中的应用 [J]. 现代制造工程, 2019, (2): 134-139.
- [3] 齐艺超,陈伟,穆春元,等. 基于粒子群自整定PID算法

- 的激光器温度控制系统[J]. 激光技术,2019, (5):60-64.
- [4] 沈春娟. 基于自适应蚁群算法的PID 控制器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016, (12):126-128.
- [5] 谭飞, 曹立佳. 基于改进动态变异差分进化的最优PID 控制[J]. 控制工程, 2019, (3):461-468.
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks [C].Piscataway, NY: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [7] 周刘喜, 张兴华, 李纬. 一种改进的多目标粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, (33):38-41.
- [8] Shi Y, Eberhart R. Parameter selection in particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming [C].Washington DC, 1998: 591-600.
- [9] Coello C C A. A comprehensive survey of evolutionary based multiobjective optimization techniques[J]. Knowledge and Information Systems, 1999, (3): 269-308.
- [10] 周刘喜, 张兴华, 李纬. 基于差分进化算法的PID 优化设计[J]. 机械与电子,2007,(12):54-56.
- [11] 张兴华, 周刘喜. PID 控制器的粒子群多目标优化设计[J]. 应用科学学报,2007,(4):392-396.
- [责任编辑: 刘 骋]

Application of Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm in PID Optimization Design

ZHOU Liu-xi ,CHEN Yu-zhong,JI Peng-peng

(Department of Electrical Engineering, Nanjing Branch of Jiangsu Union Technical Institute, Nanjing210019, China)

Abstract: In order to overcome the difficulty of choosing the weight of fitness function in PID controller parameter tuning, a multi-objective particle swarm optimization algorithm(MOPSO) was proposed. Using elite archiving strategy, MOPSO does not need to set weight parameters. According to the Pareto optimal principle, the control system of overshoot and rise time of the step response of the two indicators are optimized, thereby realizing the automatic tuning of PID controller parameters. Simulation results show that the algorithm can obtain a large number of high-quality Pareto optimal solutions, and the quality of the solutions is better than other methods.

Key words: PID; multi-objective optimization; Pareto optimal; particle swarm optimization; elite archive