

基于改进多目标遗传算法的非线性 PID 控制器参数设计

王志心, 睢刚

(东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096)

摘要: 针对 NSGA-II 算法的不足, 对其截断算法进行了改进, 使得最终的非支配个体能够更均匀分布在 Pareto 前沿面上, 并运用该方法来优化和构造非线性 PID 调节器。通过对锅炉过热汽温控制系统的仿真研究表明, 该方法获得的非线性控制器可在一定程度上兼顾系统的动态和静态性能, 相比固定参数的 PID 控制器, 控制品质有了很大的改善。

关键词: 非线性 PID; NSGA-II 算法; 截断算子; 参数整定

中图分类号: TM621.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2010)01-0004-03

由于 PID 控制器具有结构简单、鲁棒性强等优点, 在工业控制中被广泛应用。据统计, 目前工业控制器中约有 90% 仍是 PID 控制器。尽管如此, 对于 PID 控制器, 其静态与动态性能之间的矛盾, 跟踪设定值与抑制扰动之间的矛盾, 鲁棒性与控制性能之间的矛盾等, 仍没能很好地解决^[1]。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关系, 在一定程度上克服了线性 PID 控制器的缺点, 受到了越来越多的关注^[2-4]。

与传统 PID 控制器一样, 参数的选择同样决定了非线性 PID 控制性能的好坏。对于控制系统而言, 控制器参数的整定应该要综合考虑稳定性、快速性、准确性三者之间的关系, 统筹兼顾多个性能指标。所以 PID 控制器的参数整定应该是一个多目标优化问题^[5]。

文章在分析 NSGA-II 算法的基础上, 针对其截断算子的不足之处, 提出了一种改进的多目标遗传算法。相比原算法, 改进算法得到的非支配解能够更均匀地分布在 Pareto 前沿面上。在此基础上, 将其应用于锅炉过热汽温的非线性 PID 控制系统的参数整定中。文中以系统超调量、调节时间作为目标函数, 使控制品质能够同时满足多个性能指标。仿真结果证实了该方法的有效性。

1 非线性 PID 控制器

非线性 PID 控制器可以表示为

$$u(t) = k_p(e(t))e(t) + k_i(e(t)) \int_0^t e(t) dt + k_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: $k_p(e(t))$, $k_i(e(t))$, $k_d(e(t))$ 分别为比例、积分和微分系数, 它们都是误差 $e(t)$ 的非线性函数。

1.1 比例环节

比例环节的作用是加快响应速度, 减小过渡过程时间。为保证系统能够快速地跟踪跟定值的变化,

k_p 的大小应与误差的绝对值 $|e(t)|$ 成正比。比例系数为

$$k_p(e(t)) = k_{p1} + k_{p2} [\exp(k_{p3}(e(t))) + \exp(-k_{p3}(e(t)))] \quad (2)$$

1.2 积分环节

积分环节的作用是增大系统阻尼, 消除稳态误差。当 $e(t)$ 大时, k_i 不应太大, 以减小超调; 当 $e(t)$ 小时, k_i 不应太小, 以消除稳态误差。其表达式为

$$k_i(e(t)) = \frac{2k_{i1}}{\exp[k_{i2}(e(t)) + \exp(k_{i2}(e(t)))]} \quad (3)$$

1.3 微分环节

微分环节的作用是加快系统的动作速度, 减小系统的稳态误差。从系统响应开始到峰值时间, k_d 的值应逐渐增大。其表达式为

$$k_d(e(t)) = k_{d1} + \frac{k_{d2}}{1 + k_{d3} \exp(k_{d4}(e(t)))} \quad (4)$$

式(2-4)中: $k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}, k_{i1}, k_{i2}, k_{d1}, \dots, k_{d4}$ 都为正实数, 其值大小决定了系数 $k_p(e(t)), k_i(e(t)), k_d(e(t))$ 随误差 $e(t)$ 的变化速率。

2 改进的多目标遗传算法

2.1 改进的截断算法

NSGA-II 算法^[6]作为一种有效的方法已经在多目标优化领域得到广泛的应用。它采取 3 个主要策略: (1) 一种计算时间复杂性大为降低的快速排序方法来评价解的非支配性; (2) $\mu + \lambda$ 策略, 即从父代与子代群体中选择最好的个体作为新的父代群体; (3) 引入拥挤距离来度量处于同一非支配水平的解在目标空间的分布情况, 并以此为依据来建立非支配解的偏序关系。

2.1.1 计算方法

设有 2 个子目标 f_1, f_2 , 则个体 i 的拥挤距离为:

$$P[i]_{\text{distance}} = |P[i+1].f_1 - P[i-1].f_1| + |P[i+1].f_2 - P[i-1].f_2| \quad (5)$$

式中: $P[i]_{\text{distance}}$ 为第 i 个个体的拥挤距离; $P[i].m$ 为

个体 i 在子目标 m 上的函数值。

在原始 NSGA-II 中,由于截断算子的不足,会导致得到非支配解不能均匀地分布在整个 Pareto 前沿面上。

2.1.2 算法流程

Step1 根据式(1)计算处于同一非支配等级中个体的拥挤距离;

Step2 将边界点赋予最大值以确保进入下一代;

Step3 对个体按照拥挤距离进行排序,并将拥挤距离小的个体淘汰。

在原算法中,当一个拥挤距离较小的个体淘汰之后,会造成其相邻个体的拥挤距离发生变化,从而不能真实地反映个体之间真实的密度关系,如图 1 所示。

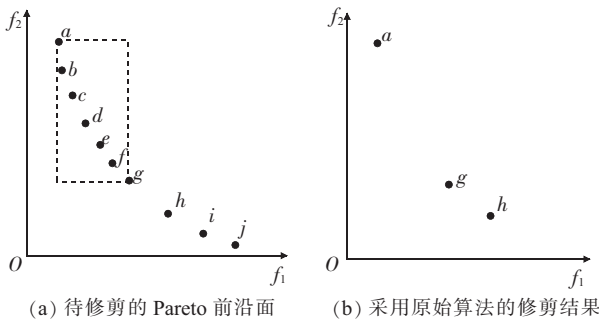


图 1 待修剪的 Pareto 前沿面及采用原始算法的修剪结果

假设在截断算法运行时存在 10 个处于同一非支配等级的解,并且需要从中选择 5 个个体进入下一代。此时运用原算法的非支配排序方式对其进行排序,将其中的拥挤距离较小的个体删除。由图 1 可知,这将造成框中没有个体存在,使得解集的分布不均匀。为解决此问题,本文加入了一个动态的更新算子,每删除一个个体后,重新计算与其相邻的个体,从而使拥挤距离能够真实地反映出个体之间的密度关系,使其最终的解集如图 2 所示。

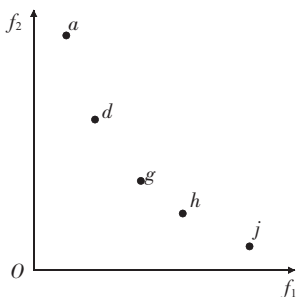


图 2 基于改进截断算法的修剪结果

2.1.3 改进的基于拥挤距离的截断算法

Step1 根据式(1)计算处于同一非支配等级中个体的拥挤距离;

Step2 将边界点赋予最大值以确保进入下一代;

Step3 将拥挤距离最小的个体从父代种群中删除,并更新与其相邻的 2 个个体的拥挤距离;

Step4 重复步骤(3)直到子代种群满足预定大小。

2.2 数值实验

为了验证改进操作的有效性,文章选取文献中常用的多目标优化基准函数 ZDT1 与 ZDT2^[7]来进行性能测试。遗传算法的优化得到的 Pareto 前沿面如图 3 所示。

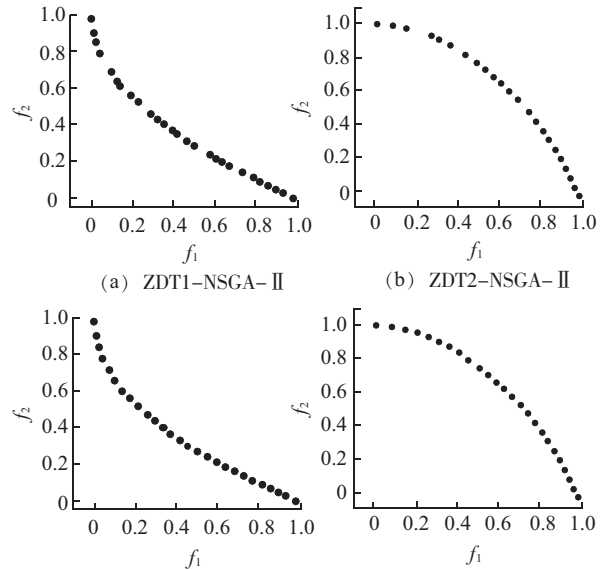


图 3 2 种算法在测试函数上的获得的 Pareto 前沿

从图 3 可以明显发现,相比原始的 NSGA-II 算法,改进算法所找到的非支配解能够更均匀地分布在整个前沿面上。

3 仿真研究

3.1 仿真对象

锅炉过热汽温串级控制系统简化方框图如图 4 所示^[8]。图中, r 为过热汽温设定值; $W_{a1}(s)$, $W_{a2}(s)$ 分别为汽温控制系统的副调节器和主调节器; $W_{o1}(s)$, $W_{o2}(s)$ 分别为调节对象的导前区和惰性区的传递函数; $W_{H1}(s)$, $W_{H2}(s)$ 分别为导前汽温和过热汽温的测量单元。各部分传递函数分别为

$$\begin{cases} W_{o1}(s) = \frac{8}{(15s+1)^2} \\ W_{o2}(s) = \frac{1.125}{(25s+1)^3} \\ W_{H1}(s) = W_{H2}(s) = 0.1 \end{cases} \quad (6)$$

副回路要求响应速度快,起随动系统作用,故电厂过热汽温串级控制的副调节器常采用的是比例调节 $W_{a1}(s)=25$;主回路要求过热汽温能够快速无偏差的跟随设定值,同时能够抑制外界扰动,因此本文采用第 1 节所述的非线性 PID 控制器。 k_{P1}, k_{P2}, k_{P3} ,

$k_{I1}, k_{I2}, k_{D1}, \dots, k_{D4}$ 则为遗传算法的待求参数。

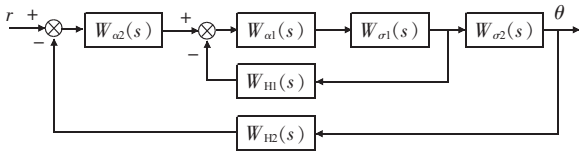


图 4 锅炉过热汽温控制系统方框图

3.2 阶跃扰动实验

假设在设定值阶跃扰动下,对于系统输出的给定性能指标为

调节时间: $t_s \leq 140$ s

超调量: $\sigma \leq 1\%$

这时采用第 2 节所述的改进多目标遗传算法针对这 2 个目标进行优化,遗传算法的参数设置为:种群大小 30,进化代数 500,交叉概率 0.9,变异概率 0.1。各参数的寻优范围为: $k_{P1} \in [0, 1], k_{P2} \in [0, 1], k_{P3} \in [0, 10], k_{I1} \in [0, 0.1], k_{I2} \in [0, 5], k_{D1} \in [0, 15], k_{D2} \in [0, 9], k_{D3} \in [0, 15], k_{D4} \in [0, 9]$ 。优化结果见图 5。

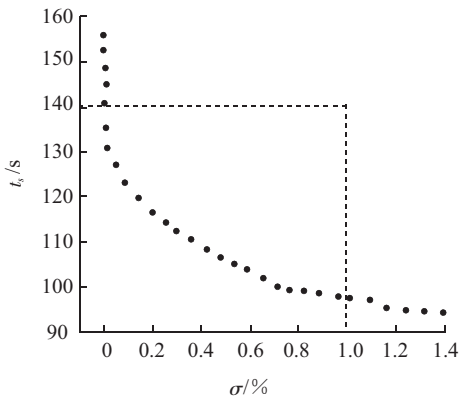


图 5 多目标优化的 Pareto 前沿

从图 4 中可以看出,满足给定要求的参数一共有 19 组。在实际应用中,可以根据具体的情况,从中选择最合适的一组参数,这取决于决策者的偏好。本文根据 ISE 指标的大小对这 18 组参数进行排序,选择了 ISE 指标最小的一组。其对应的性能指标及具体控制参数为

$$t_s = 130.86 \text{ s}, \sigma = 0.015\%$$

$$k_{P1} = 0.1706, k_{P2} = 0.3841, k_{P3} = 8.5471$$

$$k_{I1} = 0.0268, k_{I2} = 1.4390$$

$$k_{D1} = 12.6355, k_{D2} = 6.4413, k_{D3} = 9.8674, k_{D4} = 6.1760$$

设定值阶跃扰动下,整定后的非线性系统的响应曲线,如图 6 所示。其中,实线为本文采用多目标优化得到的非线性 PID 控制器;虚线为基于 ZN 法整定传统的 PID 控制器。从图 6 中可知,相比于传统 PID 控制器 250 s 左右的调节时间,非线性 PID 控制方法的调节速度快了很多,约为前者的一半,且超

调量也非常小。

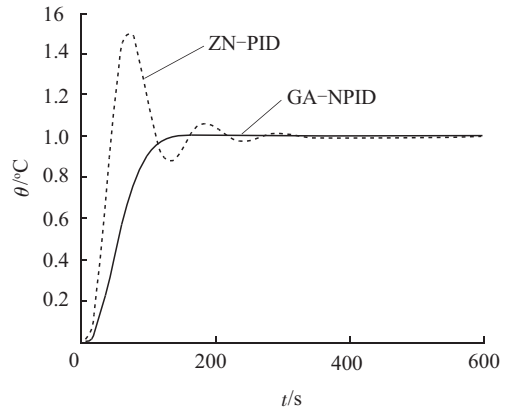


图 6 阶跃响应作用下系统的输出曲线

过热汽温过程的惯性时间常数会受积灰等因素的影响而变大,或者由于某种原因使对象的增益变大。假定对象模型变化后为

$$W'_{\alpha 2}(s) = \frac{1.5}{(30s+1)^3} \quad (7)$$

控制系统其他环节不变,得到的阶跃扰动下汽温阶跃响应曲线如图 7 所示。

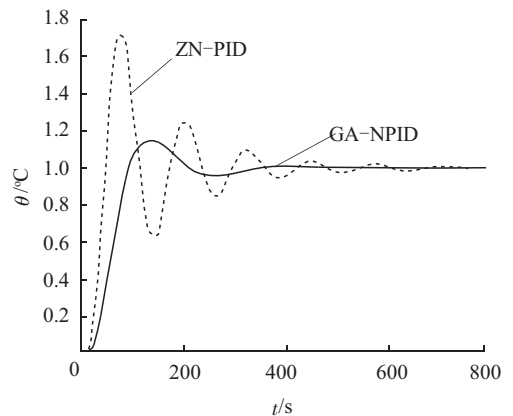


图 7 对象模型发生变化的系统响应输出曲线

从图 7 可以看出,经过整定的非线性 PID 控制器,对象的惯性和增益同设计整定时所用模型不同的情况下,其整定结果仍能够快速跟踪设定值的变化,获得较好的控制效果,说明了该算法具有较强的鲁棒性,且过渡过程动态特性明显优于传统方法。

4 结束语

针对传统 NSGA-II 算法的不足,提出了一种改进的多目标遗传算法,并将其应用于锅炉过热汽温的非线性 PID 控制系统设计中。遗传算法使非线性函数得到优化,使该非线性 PID 控制器不但比传统的固定参数 PID 控制器更好地保证了控制系统快速性和平稳性,并且能满足既定的控制性能指标。

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.

基于 IEC 61850 标准的变电站站控层双网通信的实现

笃峻¹, 李皓², 胡绍谦¹

(1.南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211100; 2.台州宏远电力设计院, 浙江临海 317000)

摘要:结合变电站应用实践, 针对 IEC 61850 变电站基于双星形网络架构的站控层网络, 详细介绍了几种双网通信方案的技术细节, 比较与分析了各种方案的利弊, 给出了各种方案的适用条件, 并提出了一种兼顾可靠性与运行性能、切实可行的站控层双网通信方案。

关键词:IEC 61850 标准; 站控层双网; 热备用; 互操作

中图分类号:TM63

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2010)01-0007-04

IEC 61850 标准正在逐渐成为变电站通信网络的一个重要标准, 它的出现为变电站内各厂家不同型号装置之间的互连互通提供了一套全新的解决方案。标准详细描述了变电站内通信系统的框架模型, 其主要特点是通过定义抽象通信服务接口(ACSI)到不同的特殊服务通信映射(SCSM)来实现通信协议与应用及通信介质的分离, 解决了标准的稳定性与未来通信技术发展之间的矛盾, 使标准更能适应未来通信技术的发展需求^[1]。也正是因为标准试图保证其未来发展的稳定性, 而没有对具体的通信实现进行详细的规范。目前国内的 61850 变电站工程, 站控层普遍采用制造报文规范(MMS)+TCP/IP+ 以

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2009-10-20

太网的通信服务映射模式, 其中很多高电压等级的变电站更是采用了双星形的双网通信网络架构, 由于标准未对站控层如何实现双网通信进行明确规定, 实际工程中各厂家亦采用了各种不同的双网通信方案, 各方案之间互不兼容给双网条件下的互操作带来了困难。因双网通信的复杂性, 使得在历次用户组织的互操作试验中也都回避了这一问题^[2]。随着 IEC 61850 标准在国内变电站工程中的推广, 站控层如何实现双网通信将是一个不容忽视和回避的问题。

1 站控层双网通信问题概述

其实站控层双网通信问题并不是 IEC 61850 标准带来的问题, 早在 103 规约时代各厂家对站控层

[2] 胡包钢. 非线性 PID 控制器研究——比例分量的非线性方法[J]. 自动化学报, 2006, 32(2): 219-227.
[3] 徐春梅, 张浩, 杨平. 汽包水位串级三冲量非线性 PID 控制系统[J]. 华东电力, 2009(5): 238-241.
[4] 尚宏, 陈志敏, 任永平. 一种新型非线性 PID 控制器及其参数设计[J]. 控制理论与应用, 2009(4): 439-442.
[5] 谢涛, 陈火旺, 康立山. 多目标优化的演化算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 997-1003.
[6] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimisation; NSGA-II[C]. Springer-Verlag, 2000.

[7] DEB K. Multi-objective Genetic Algorithms: Problem Difficulties and Construction of Test Problems [J]. Evolutionary Computation, 1999, 7(3): 205-230.
[8] 陈来九. 热工过程自动调节原理[M]. 北京: 水利水电出版社, 1982.

作者简介:

王志心(1984-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为热工过程优化控制;
睢刚(1966-), 男, 江苏仪征人, 教授, 主要研究方向为热工过程优化控制。

Parameter Selection for the Nonlinear PID Controller Based an Improved Genetic Algorithm

WANG Zhi-xin, JU Gang

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An improved multi-objective NSGA-II algorithm is presented in this paper, which can find the well-distributed Pareto optimal solutions by using an improved crowding-distance truncation operator. Furthermore, this algorithm is applied to optimize and construct the nonlinear PID controller. The simulation results of boil superheated steam temperature control system indicate that both the dynamic and static performances of the system are increased at a certain degree, and control quality is improved greatly.

Key word: nonlinear PID controller; NSGA-II algorithm; truncation operators; parameter tuning