

8-13-2020

Optimized Linear Active Disturbance Rejection Controller Design for Hydraulic Turbine Governing Systems

Huang Yu

Hebei Engineering Research Center of Simulation ? Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Jiarong Wang

Hebei Engineering Research Center of Simulation ? Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimized Linear Active Disturbance Rejection Controller Design for Hydraulic Turbine Governing Systems

Abstract

Abstract: The linear active disturbance rejection control is difficult to obtain good control effect as its parameters are not easy to get. *A gravitational search algorithm based on Nelder-Mead (NM) simplex search was presented. The replace mechanism of NM simplex search and the particles update method of gravitational search algorithm were combined together in this algorithm. Simplex method has strong local search ability, therefore, the algorithm can overcome the shortcomings of gravitational search algorithm plunging into the local optimal.* The proposed algorithm was applied to the parameter optimization of linear active disturbance rejection controller of hydraulic turbine governor system. Simulation results show that: the optimized linear active disturbance rejection control can well suppress overshoot, reduce the negative tone and shorten adjustment time. When system conditions change, control results are still satisfactory. The control performance is much better than PID controller in anti-interference as it has strong robustness.

Keywords

hydraulic turbine regulating system, linear active disturbance rejection control, gravitational search algorithm, NM simplex search

Recommended Citation

Huang Yu, Wang Jiarong. Optimized Linear Active Disturbance Rejection Controller Design for Hydraulic Turbine Governing Systems[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 3033-3040.

水轮机调速系统的线性自抗扰优化控制

黄宇, 王佳荣

(华北电力大学 河北省发电过程仿真与优化控制工程技术研究中心, 保定 071003)

摘要: 针对线性自抗扰控制器参数较多、调节起来较为困难的缺点。提出一种基于下山单纯形法的引力搜索算法, 该算法将下山单纯形法的替换机制融入到引力搜索算法粒子的更新中, 利用单纯形法具有较强的局部搜索能力, 有效克服了引力搜索算法陷入局部最优的缺点。将本文提出的算法应用于水轮机调速系统的线性自抗扰控制器参数优化。仿真结果表明: 优化后的线性自抗扰控制器能够很好的抑制超调、减小负调并缩短调节时间, 在系统工况发生变化时, 仍有良好的控制效果, 具有较强的鲁棒性, 且能够取得比 PID 控制更好的抗干扰性能。

关键词: 水轮机调速系统; 线性自抗扰控制; 引力搜索算法; 下山单纯形法

中图分类号: TK730

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 12-3033-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612022

Optimized Linear Active Disturbance Rejection Controller Design for Hydraulic Turbine Governing Systems

Huang Yu, Wang Jiarong

(Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The linear active disturbance rejection control is difficult to obtain good control effect as its parameters are not easy to get. A gravitational search algorithm based on Nelder-Mead (NM) simplex search was presented. The replace mechanism of NM simplex search and the particles update method of gravitational search algorithm were combined together in this algorithm. Simplex method has strong local search ability, therefore, the algorithm can overcome the shortcomings of gravitational search algorithm plunging into the local optimal. The proposed algorithm was applied to the parameter optimization of linear active disturbance rejection controller of hydraulic turbine governor system. Simulation results show that: the optimized linear active disturbance rejection control can well suppress overshoot, reduce the negative tone and shorten adjustment time. When system conditions change, control results are still satisfactory. The control performance is much better than PID controller in anti-interference as it has strong robustness.

Keywords: hydraulic turbine regulating system; linear active disturbance rejection control; gravitational search algorithm; NM simplex search

引言

水力发电在电力系统调峰、调频任务中发挥着

越来越重要的作用。水轮机调速系统作为水电机组的核心控制系统, 是一个典型的非最小相位系统^[1]。电网负荷的变化会给水轮机调速系统带来较大的扰动, 从而对系统的稳定性产生较大影响, 使用常规控制方式难以保证良好的控制效果^[2-3]。近年来, 人们已经开始尝试将一些先进的控制算法和策略对水轮机调速系统进行控制, 如多性能指标非



收稿日期: 2015-10-20 修回日期: 2016-04-13;
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金
(2015MS66);
作者简介: 黄宇(1982-), 男, 江苏沐阳, 博士, 讲
师, 研究方向为热工系统辨识与控制; 王佳荣
(1988-), 女, 河北保定, 硕士生, 研究方向为热工
控制系统结构及参数优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 3033 •

线性控制^[4]、预测 PI 控制^[5]、神经网络模糊 PID 控制^[6]、 H_∞ 双回路鲁棒控制^[7]等为提高该水轮机调速系统的控制品质作出了有益的探索。但是，上述控制方式，存在着算法复杂、对系统的负调和扰动等抑制效果欠佳等缺点。为了解决上述控制方式所存在的问题，本文将线性自抗扰控制器^[8] (linear active disturbance rejection control, LADRC) 引入水轮机调速系统的控制。

线性自抗扰控制是基于自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[9-10]思想，以线性化实现形式设计 ADRC 各部分结构。相比于 ADRC, LADRC 结构更为简单，物理意义也更明确。目前，LADRC 已经在 ALSTOM 气化炉^[11]、汽包锅炉单元机组^[12]、过热汽温串级控制系统^[13]等方面得到了广泛的应用，并且取得了良好的控制效果。但是，利用 LADRC 对非最小相位系统进行控制时，难以准确确定其控制器参数，不易取得较好的控制效果。

为了更加准确的确定水轮机调速系统中线性自抗扰控制器的参数，本文将下山(Nelder-Mead, NM)单纯形法与引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA)相结合，提出一种基于下山单纯形法的引力搜索算法(Nelder-Mead simplex search Gravitational Search Algorithm, NMGSA)。该算法将下山单纯形法的搜索替换机制融入到 GSA 粒子的更新中，保证了种群的多样性和最好粒子的延续性。另外，下山单纯形法强大的局部搜索能力可以使陷入局部最优的粒子及时跳出，克服了 GSA 在寻优过程中易陷入局部最优的缺点。最后，通过仿真试验验证了所提方法的有效性和鲁棒性。

1 水轮机调速系统的分析

水轮机调速控制系统的结构如图 1 所示^[14]。

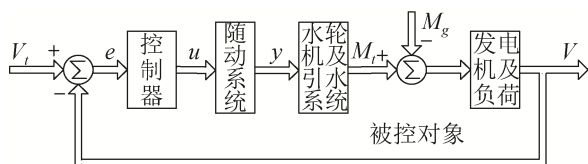


图 1 水轮机调速控制系统

图 1 中， V_i 为水轮机发电机组的期望转速； u 为水轮机发电机组的控制量； y 为接力器行程； V 为水轮机发电机组的实际转速； M_t 为水轮机出力矩； M_g 为扰动或者负载。

在以往的研究中，一般对随动系统作大量的简化处理，将其简化为一个一阶惯性系统，简化模型如图 2(a)所示，其闭环传递函数为^[15]：

$$G_s(s) = \frac{1}{1 + T_y s} \tag{1}$$

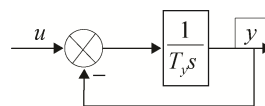
式中： T_y 为缓冲时间常数。

水轮机及引水系统组段方框图如图 2(b)所示。其中： e_y , e_h , e_{qy} , e_{qh} 分别为水轮机的传递系数。由此可列出传递函数为；

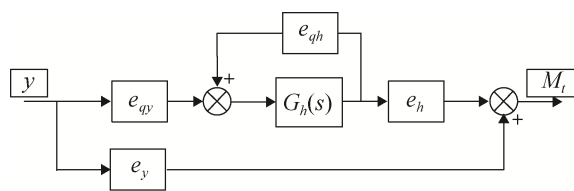
$$G_t(s) = e_{qy} \frac{G_h(s)e_h}{1 - e_{qh}G_h(s)} + e_y = \frac{e_y + G_h(s)(e_{qy}e_h - e_{qh}e_y)}{1 - e_{qh}G_h(s)} \tag{2}$$

令 $e = e_{qy}e_h - e_{qh}e_y$ ，可以得出：

$$G_t(s) = \frac{e_y + eG_h(s)}{1 - e_{qh}G_h(s)} \tag{3}$$



(a) 随动系统简化方框图



(b) 水轮机及引水系统简化方框图

图 2 水轮机调速系统部分结构简化方框图

本文以刚性水击为例，有 $G_h(s) = -T_w s$ ，其中， T_w 为有水压引水系统水流惯性时间常数，并将其带入(3)式中。

最终，得到水轮机及引水系统传递函数为：

$$G_t(t) = \frac{e_y - eT_w s}{1 + e_{qh}T_w s} \tag{4}$$

发电机及负荷传递函数为一阶惯性环节。其传

递函数表示为:

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_n} \quad (5)$$

式中: T_a 为机组惯性时间常数, e_n 为水轮机综合自调节系数。

经前人大量的研究可知^[16-17], 水轮机调速系统是一个典型的非最小相位系统。该系统除出现超调现象外, 还会出现负调现象。在对此类系统进行控制时, 不但要抑制超调、缩短调节时间, 还需要减小负调量。为此, 本文将线性自抗扰控制器用于水轮机调速系统的控制。

2 线性自抗扰控制策略

通常, 二阶线性自抗扰控制器的闭环控制结构如图 3 所示^[18-19]。

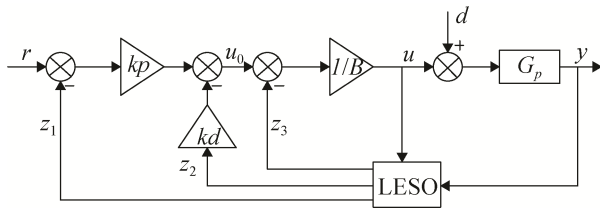


图 3 二阶 LADRC 控制器结构

图 3 中, G_p 为被控对象。作用于控制回路的两个外部信号分别为设定值 r 和扰动量 d 。线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, ESO)根据测量到的输入(控制信号 u 和系统输出 y)和输出(z_1 , z_2 和 z_3)来确定系统内部所有状态信息, 即可实现反馈线性化, 实现对系统的控制。 k_p 、 k_d 和 B 为 LADRC 控制器的控制增益。

二阶 LESO 的实现方程如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(y - z_1) + Bu \\ \dot{z}_3 = \beta_3(y - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: z_1 , z_2 , z_3 为 ESO 的状态变量, β_1 , β_2 , β_3 为可调参数。当式(6)所示的 LESO 被正确整定时, z_1 , z_2 , z_3 将分别跟踪 y , \dot{y} 和 f 。

图 3 中的控制率如下式所示:

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d z_2 \quad (7)$$

$$u = \frac{u_0 - z_3}{B} \quad (8)$$

一般地, 由 LADRC 控制器结构及控制率, 应用梅森公式求解可得系统的闭环传递函数为:

$$G_b = \frac{G_p(s)k_p(s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3)}{BA_1(s) + G_p(s)A_2(s)} \quad (9)$$

其中,

$$A_1(s) = s^3 + (\beta_1 + k_d)s^2 + (\beta_1 k_d + \beta_2 + k_p)s$$

$$A_2(s) = (\beta_1 k_p + \beta_2 k_d + \beta_3)s^2 + (\beta_2 k_p + \beta_3 k_d)s + \beta_3 k_p$$

由文献[20]可知, 在(9)式中

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 3\omega_o, \beta_2 = 3\omega_o^2, \beta_3 = \omega_o^3 \\ k_d &= 2\omega_c, k_p = \omega_c^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: ω_c 为控制器带宽, ω_o 为观测器带宽, 且 $\omega_o = 4\omega_c$ 。

同时, 为了灵活的改变 LADRC 的调节能力, 本文提出对控制器增益 k_p 作如下调整:

$$k_p = K\omega_c^2 \quad (11)$$

式中: K 为待优化的动态调整系数。

综上, 由式(9)~(11)可知, LADRC 控制系统的闭环传递函数只剩下三个需要调节的参数, 分别为控制器带宽 ω_c 、控制器的控制增益 B 和动态调整系数 K 。为了获取最优的 LADRC 控制性能, 本文提出基于下山单纯形法的引力搜索算法, 对上述三个可调参数进行优化。

3 基于下山单纯形法的引力搜索算法

3.1 引力搜索算法

引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA)是 Rashedi 等人基于万有引力定律提出的^[21-22]。在 GSA 中, 粒子的惯性质量是根据其适应度函数值得出的, 粒子适应度的好坏对应其惯性质量的大小。每个粒子的位置对应于优化问题的一个候选解, 在解空间内由向量 X 表示。在 t 时刻, n 维空间中粒子 j 作用于粒子 i 的引力由公式(12)计算得出。

$$F_{ij}^n(t) = G(t) \left(\frac{M_i(t) \times M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} \right) (X_j^n - X_i^n) \quad (12)$$

式(12)中, $R_{ij}(t)$ 表示在搜索空间中, 粒子 i 与粒子 j 之间的距离; ε 是一个极小的常数, 可以避免式(12)中出现分母为零的情况; $G(t)$ 为万有引力常数。

第 i 个粒子在 t 时刻的加速度为:

$$a_i^n(t) = \frac{F_i^n(t)}{M_i^n(t)} \quad (13)$$

式中: F_i^d 为粒子 i 所受的总作用力, 可以看作其它所有粒子对其作用力的随机加权和。 M_i^n 为第 i 个粒子的惯性质量。

GSA 中速度和位置的更新运动方程分别如式(14)和式(15)所示。

$$v_i^d(t+1) = rand_i \cdot v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (14)$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (15)$$

综上, 标准的引力搜索算法流程如下所示:

Step 1: 初始化。明确搜索空间与参数取值, 初始化种群数目、最大迭代次数、万有引力系数与粒子位置;

Step 2: 根据目标函数和设定范围求粒子的适应度函数值;

Step 3: 更新万有引力系数与粒子质量;

Step 4: 计算不同方向上的总作用力, 计算粒子的速度和加速度;

Step 5: 利用式(19)和(20)更新粒子的速度和位置;

Step 6: 重复迭代以上步骤, 直到达到最大迭代次数。

从公式(17)~(19)可以看出, GSA 中的粒子在向最优解运动时, 其所受的万有引力值可能会增加, 导致粒子在接近最优解时的速度可能会很大。当粒子越过最优解时, 受力的方向突然改变, 这可能会导致粒子在最优解附近反复来回震荡, 从而令算法陷入局部最优。因此, 需要对 GSA 算法进行改进。

3.2 NM 单纯形算法

下山单纯形法是由 Nelder 和 Mead 提出的直接搜索算法, 主要用于无约束函数优化问题的局部搜索^[23]。其核心思想为: 比较单纯形各顶点对应的适应度函数值, 并以此作为判断各点好坏的依据,

将通过反射、膨胀和收缩三种操作得出的新点替换原单纯形中最差的点, 形成新的单纯形, 从而通过迭代而逼近最优点。单纯形法具有高效的局部搜索能力, 已经在很多领域取得了成功的应用。

考虑 n 维函数优化问题, 设 X_1, X_2, \dots, X_{n+1} 是 n 维空间中的 $n+1$ 个点。每次搜索前, 按照各点对应的适应度函数值的大小进行排序, 使得 $f(X_1) \leq f(X_2) \leq \dots \leq f(X_{n+1})$, 并计算最差点的反射点 X_r 。下山单纯形法的具体流程如下所示:

Step 1: 将 $n+1$ 个点按照其所对应的适应度函数值的大小进行排序和编号;

Step 2: 计算反射点 X_r ,

$$X_r = \bar{X} + \alpha \cdot (\bar{X} - X_{n+1}), \quad \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad \text{且 } \alpha > 0$$

若 $f(X_1) < f(X_r) < f(X_n)$, 则接受 X_r , 并结束搜索;

当 $f(X_r) < f(X_1)$ 时, 则转向 Step3;

当 $f(X_r) \geq f(X_n)$ 时, 则转向 Step4;

Step 3: 产生膨胀点 X_e ,

$$X_e = \bar{X} + \beta \cdot (X_r - \bar{X}), \quad \beta > 1$$

若 $f(X_e) \leq f(X_r)$, 则接受 X_e , 并结束搜索;

若 $f(X_r) < f(X_e)$, 则接受 X_r , 并结束搜索;

Step 4: 当 $f(X_r) < f(X_{n+1})$ 时, 产生外收缩点 X_c ,

$$X_c = \bar{X} + \gamma \cdot (X_r - \bar{X}), \quad 0 < \gamma < 1;$$

若 $f(X_c) \leq f(X_r)$, 则接受 X_c , 并结束搜索,

否则转向 Step 5;

当 $f(X_r) \geq f(X_{n+1})$ 时, 产生内收缩点 X_c ,

$$X_c = \bar{X} - \gamma \cdot (\bar{X} - X_{n+1}), \quad 0 < \gamma < 1;$$

若 $f(X_c) \leq f(X_r)$, 则接受 X_c , 并结束搜索,

否则转向 Step5;

Step 5: 产生一系列新点 V_i 替换对应的旧点, 形成新的单纯形。

$$V_i = X_1 + \delta \cdot (X_i - X_1), \quad i = 2, \dots, n+1, \quad 0 < \delta < 1$$

3.3 基于下山单纯形法的引力搜索算法

GSA 具有较强的全局搜索能力, 但容易陷入局部最优, 而下山单纯形法的局部搜索能力很强。因此, 本文将下山单纯形法与 GSA 相结合, 提出一种基于下山单纯形法的引力搜索算法

(NMGSA), 该算法将下山单纯形法的搜索替换机制融入到 GSA 粒子的更新中。

对于优化问题, 设 GSA 的种群大小为 N 。单纯形的中心点根据最好的 Q 个粒子确定, 计算公式如下:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^Q X_i / Q \quad (16)$$

式中: \bar{X} 为种群中最好的 Q 个粒子的几何中心。

对种群中最差的 P 个粒子根据中心点执行单纯形法中的反射、膨胀、收缩等操作, 剩余的 $N-P-Q$ 个粒子执行 GSA 中的位置更新操作, Q 个最好点直接进入下一次迭代。这种更新种群的方式, 保证了种群的多样性和最好粒子的延续性, 令最差粒子快速逼近最优点。更重要的是, 单纯形法强大的局部搜索能力可以使陷入局部振荡的粒子及时跳出, 避免算法陷入局部最优。NMGSA 算法构造新种群的直观示意图如图 4 所示。

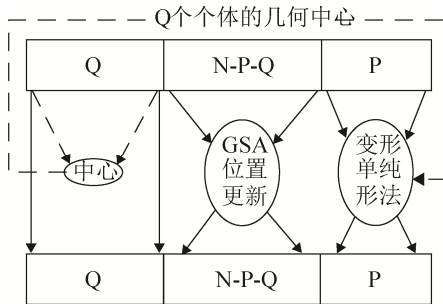


图 4 NMGSA 示意图

3.4 NMGSA 计算复杂度分析

算法的计算复杂度包括空间复杂度和时间复杂度。空间复杂度是用来度量算法计算所占用存储空间的大小。本文算法将下山单纯形法对粒子的搜索替换机制融入到 GSA 对粒子的更新中, 改变了一部分粒子的更新迭代方式, 但是增加的复杂度是线性阶的。所以在低维条件下, 对存储空间的增加并不多。

时间复杂度通常情况下等同于算法执行基本操作的次数。在引入下山单纯形法后, 由于每次迭代均增加了将所有粒子的适应度函数值按大小进行排序的步骤, 增加了 $O(t_{\max}nm)$ 级的运算量(n 为

为问题的维数, m 种群规模), 但是由于标准 GSA 最坏情况下的计算复杂度为 $O(t_{\max}n^2m)$, 因此本文提出算法的时间复杂度仍然与标准 GSA 算法的时间复杂度相同。

3.5 NMGSA 实验性能测试

为了证明所提出算法的有效性, 本文选择了 6 个标准基准测试函数, 这些函数已经被广泛的用于测试优化算法的性能^[23]。本文采用测试函数的维度、变量的容许范围和最优值汇总如表 1 所示。

表 1 基准测试函数

测试函数	搜索范围	最优解
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100,100]^n$	0
$f_2(x) = \max\{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	$[-100,100]^n$	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j^2)^2$	$[-100,100]^n$	0
$f_4(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}}) + 1$	$[-600,600]^n$	0
$f_5(x) = \sum_{i=1}^{11} [a_i - \frac{x_i(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4}]^2$	$[-5,5]^4$	0.000 3
$f_6(x) = (x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2} x_1^2 + \frac{5}{\pi} x_1 - 6)^2 + 10(1 - \frac{1}{8\pi}) \cos x_1 + 10$	$[-5,10] \times [0,15]$	0.398

在表 1 中, 除 f_5 和 f_6 为低维测试函数外, 其余均为高维测试函数, n 代表函数的维数。 f_1 、 f_2 与 f_3 为单峰测试函数, f_4 、 f_5 与 f_6 为多峰测试函数, 有多个最优值点。将本文算法与粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)、GSA 算法以及记忆改进的引力搜索算法 (Memory Gravitational Search Algorithm, MGSA) 相比较。在相同的给定条件下, 比较四种算法求最优解的能力, 最优解的平均值与理论值越接近, 表明算法求解的精度越高。

NMGSA 参数设置为: $Q=5$, $P=15$, 种群规模均设置为 50, 即 $N=50$ 。多维函数的维数 n 设为 30, 最大迭代次数为 1 000, 对每个测试函数独立实验 30 次。对于其他系统, 算法设置相同。测试结果如表 2 所示, 其中 PSO 算法与 GSA 的计算结果参见文献^[24], MGSA 的计算结果参见文献^[25]。

表 2 六种算法的实验结果比较

函数	PSO	GSA	MGSA	NMGSA	
f_1	平均值	1.80×10^{-3}	7.3×10^{-11}	6.49×10^{-16}	6.82×10^{-19}
	中值	1.20×10^{-3}	7.1×10^{-11}	6.44×10^{-16}	7.94×10^{-19}
f_2	平均值	8.100 0	3.70×10^{-6}	1.03×10^{-8}	4.69×10^{-10}
	中值	7.400 0	3.70×10^{-6}	1.00×10^{-8}	4.55×10^{-10}
f_3	平均值	4.10×10^3	0.16×10^3	15.435 1	2.11×10^{-18}
	中值	2.20×10^3	0.15×10^3	12.420 8	3.23×10^{-18}
f_4	平均值	0.010 0	0.29	1.447 5	0
	中值	0.008 1	0.04	1.306 0	0
f_5	平均值	2.80×10^{-3}	8.0×10^{-3}	7.02×10^{-4}	3.72×10^{-4}
	中值	7.1×10^{-4}	7.4×10^{-4}	7.11×10^{-4}	3.25×10^{-4}
f_6	平均值	0.397 9	0.3979	0.3979	0.397 9
	中值	0.397 9	0.3979	0.3979	0.397 9

从表 2 中的实验结果可以看出,应用本文算法对函数 f_1 、 f_2 和 f_3 进行寻优,最终结果无论是中值还是平均值,在寻优精度上都远高于 PSO 算法、GSA 和 MGSA。对于函数 f_4 ,本文算法更是准确的找到了其函数最优值 0。函数 f_5 与 f_6 的最优值为非 0,应用本文 NMGSA 算法得出的实验结果相比于 PSO 算法、GSA 和 MGSA 更接近最优值。根据以上实验结果分析,表明本文提出的算法具有较强的搜索能力和较为普遍的适用性。

4 仿真与实验

本文所采用的水轮机调速控制系统模型结构如图 1 所示,图 1 中的控制器为二阶线性自抗扰控制器,其结构如图 2 所示。水轮机设计水头带满负荷工况下各参数分别为^[26]: $e_y=0.74$, $e_h=1.46$, $e_n=1.5$, $e_{qv}=0.789$, $e_{qh}=0.491$, $T_y=0.1s$, $T_a=6s$, $T_w=1.5$ 。由 3.2 节可知, LADRC 的待优化参数有三个,分别为 ω_c , K 和 B 。

依据热工控制系统设计中广泛采用的性能评价指标,选取如下式所示的综合型目标函数:

$$Q = \left\{ d_1 \int_0^{t_s} [c_1 t |e(t)| + c_2 u^2(t)] dt \right\} + \left\{ d_2 |M_p - M_{pm}| \right\} \quad (17)$$

式中: d_1 , d_2 分别为积分型目标函数和指标型目标函数的权值; c_1 , c_2 分别为误差和控制量在目标函数中的权值; t_s 为过渡过程时间; $u(t)$ 为控制器输出量; $e(t)$ 为输入量与系统的输出量之间的误差; M_p 为当前

曲线的超调量; M_{pm} 允许达到的最大超调量。

利用本文提出的 NMGSA 对 LADRC 参数进行优化,选取 NMGSA 的最大迭代次数为 1 000,种群规模为 50, $Q=5$, $P=15$ 。寻优得出的 LADRC 参数为: $\omega_c=1.763 1$, $B=2.900 2$ 和 $K=0.350 1$ 。

为了与传统 PID 控制进行分析比较,本文给出了经本文算法进行参数优化后的 PID 控制器的控制效果。采用本文优化算法得出的 PID 控制器参数为: $K_p=3.15$, $K_i=0.57$, $K_d=1.92$ 。图 5 给出了 LADRC 与 PID 控制效果的比较。图 5(a)~(b)为频率扰动 10% 时, PID 和 LADRC 的控制效果比较。

从图 5(a)中可以看到, PID 控制器的系统响应曲线反调为 -0.051, 达到稳态的时间为 10 s 左右。LADRC 的系统响应曲线反调为 -0.013, 达到稳态的时间也为 10 s 左右。可见, LADRC 系统在抑制反调方面明显优于 PID 控制器,并且达到稳态的时间与 PID 控制器相当。图 5(b)为 PID 与 LADRC 的控制器输出的对比图, PID 控制器的控制器输出起始点为 20, 基于 NMGSA 的 LADRC 控制器输出起始点为 0.051, 相比较 PID 控制器, LADRC 的控制器输出波动更小。由此可见,基于 NMGSA 的 LADRC 的控制品质优于基于 NMGSA 的 PID 的控制品质。

为了验证本文控制方法的鲁棒性,选在最小水头为限制线的工况。水轮机的参数变化为 $e_y=0.324$, $e_h=1.41$, $e_{qv}=0.593$, $e_{qh}=0.578$, 其它参数保持不变条件下,图 5(c)为频率扰动 10% 时的控制效果图。由图 5(c)可以看出,通过本文算法得出的最佳整定参数,在对象特性发生变化的情况下,仍能获得比 PID 控制器更好的控制效果,说明本文具有较强的鲁棒性和较好的调节品质。

为了进一步验证系统的抗扰性,在水头带满负荷工况下对水轮机调速系统作单位阶跃扰动,系统的响应曲线如图 5(d)所示。

从图 5(d)可以看出, LADRC 对扰动的抑制要明显优于 PID 控制器,具有良好的抑制作用。

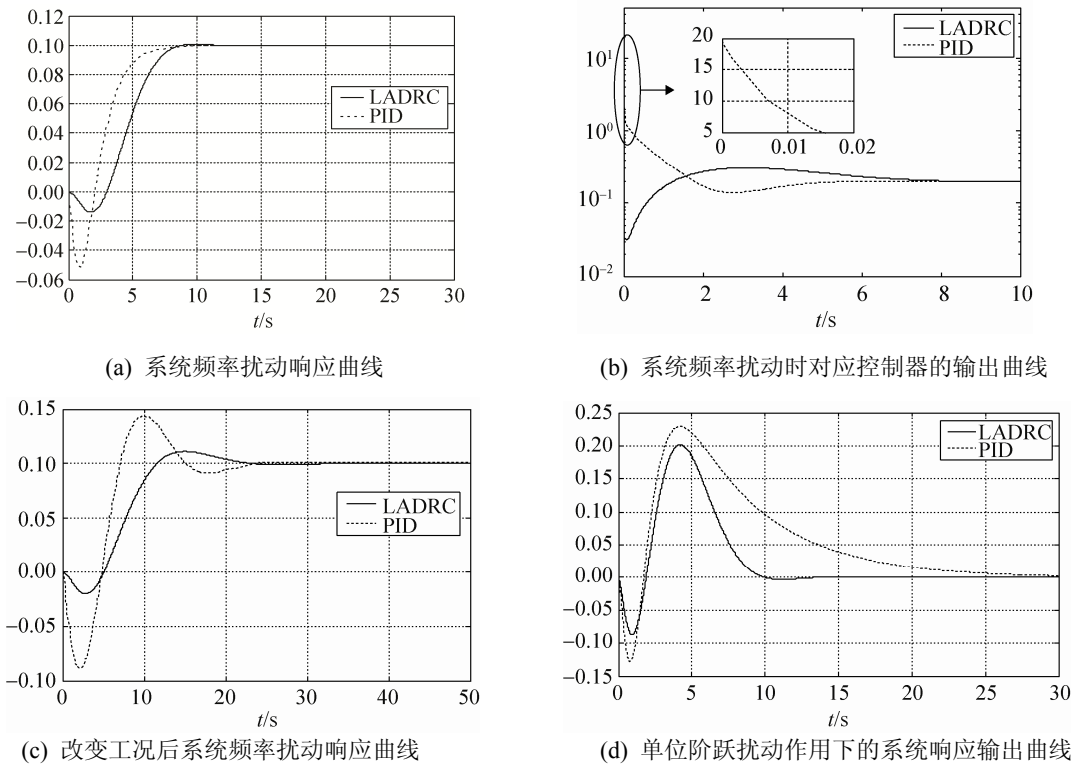


图 5 仿真与实验结果图

综上, 相比于基于 NMGSA 的 PID 控制器, 在利用基于 NMGSA 的 LADRC 对水轮机调速控制系统进行控制时, 基于 NMGSA 的 LADRC 控制可以较好的抑制超调、减小负调并缩短调节时间。当系统发生变化时, 本文控制方案也能获得良好的控制效果, 说明其具有较强的鲁棒性。同时, 当系统存在较大扰动时, LADRC 对扰动的抑制效果也强于 PID 控制。

5 结论

LADRC 控制器参数的整定通常依赖于经验或反复试验获取, 十分耗时而且繁琐。本文提出了一种基于下山单纯形法的引力搜索算法并用于 LADRC 的参数优化, 此算法将下山单纯形法的搜索替换机制融入到 GSA 粒子的更新中, 利用单纯形法具有的较强局部搜索能力, 使陷入局部振荡的粒子及时跳出, 避免了 GSA 算法陷入局部最优的缺点。仿真结果表明: 优化后的线性自抗扰控制器能够更好的抑制超调、减小负调并缩短调节时间,

在系统工况发生变化时, 控制效果仍然很好, 具有较强的鲁棒性, 且能够取得比基于 NMGSA 的 PID 控制更好的抗干扰性能。

参考文献:

- [1] 方红庆, 陈龙, 李训铭. 基于线性与非线性模型的水轮机调速器 PID 参数优化比较 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(5): 100-106.
- [2] 曾河华, 李东海, 姜学智, 等. 水轮发电机组的非线性 PID 控制 [J]. 清华大学学报自然科学版, 2004, 44(11): 1554-1557.
- [3] 宁喜荣, 李东海, 姜学智, 等. 水轮发电机组非线性控制器优化研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 114-119.
- [4] 孔繁镛, 李啸懿, 吴杰康, 等. 具有多性能指标的水轮机调速器非线性设计 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 229-236.
- [5] 韩光信, 乔元静, 刘艳玲, 等. 非最小相位水轮机系统的预测 PI 控制 [J]. 吉林化工学院学报, 2014, 31(5): 66-68.
- [6] 王华强, 石亚娟, 王健波, 等. 神经网络模糊 PID 在水轮机调速系统中的应用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(9): 1187-1191.
- [7] 孔繁镛, 吴杰康. 水轮机调速系统的 H_∞ 双回路鲁棒

- 控制策略 [J]. 电网技术, 2011, 35(8): 212-217.
- [8] 谭文, 周宏, 傅彩芬, 等. 负荷频率控制系统的线性自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1580-1588.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [10] 周洪煜, 汪正海, 黄建平, 等. 蒸汽发生器水位 SDRNN 优化自抗扰控制 [J]. 动力工程学报, 2013, 33(10): 789-794, 807.
- [11] 陈世和, 李强, 李东海, 等. 气化炉的线性自抗扰控制 [J]. 华东电力, 2014, 42(3): 610-615.
- [12] 楼冠男, 谭文, 郑勤玲, 等. 汽包锅炉单元机组协调系统的线性自抗扰控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(23): 94-100.
- [13] 孙立, 董君伊, 李东海. 基于果蝇算法的过热汽温自抗扰优化控制 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(10): 1288-1292.
- [14] 姜胜, 陈启卷, 蔡维由, 等. 水轮机调速器参数仿真寻优策略 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 102-106.
- [15] 田勇, 武文斌, 刘保国. 电液随动系统模型对水轮机调节的影响研究 [J]. 机床与液压, 2007, 35(1): 165-167.
- [16] 孙美凤, 王铁生, 陆桂明. 水力机组预测控制分析与研究 [J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 230-234.
- [17] 王淑青, 曾仕琦, 吴珊, 等. 基于 NNARX 的动态神经网络模型的水电机组预测控制 [J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 191-195.
- [18] Chen Xing, Li Donghai, Gao Zhiqiang, et al. Turning method for second-order active disturbance rejection control [C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference (IEEE), Yantai, China, 2011. USA: IEEE, 2011: 6322-6327.
- [19] 孙立, 董君伊, 李东海, 等. 基于扩张状态观测器的汽轮机功频电液串级控制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1697-1703.
- [20] 陈星. 自抗扰控制器参数整定方法及其在热工过程中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [21] 牛培峰, 肖兴军, 李国强, 等. 基于万有引力搜索算法的电厂锅炉 NO_x 排放模型的参数优化 [J]. 动力工程学报, 2013, 33(2): 100-106.
- [22] 戢钢, 王景成, 葛阳, 等. 城市小时级需水量的改进型引力搜索算法-最小二乘支持向量机模型预测 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(10): 1377-1382.
- [23] 王凌. 混合差分进化与调度算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [24] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm [J]. Information Science (S0020-0255), 2009, 179(13): 2232-2248.
- [25] 李春龙, 戴娟, 潘丰, 等. 引力搜索算法中粒子记忆性改进的研究 [J]. 计算机应用, 2012, 32(10): 2732-2735.
- [26] 王涛, 杨晓萍, 余向阳, 等. 基于神经网络的水轮机调节系统自抗扰控制 [J]. 水力发电学报, 2006, 25(3): 125-129.

(上接第 3032 页)

参考文献:

- [1] 段琢华, 蔡自兴, 于金霞. 激光雷达异常检测及鲁棒测量模型 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1500-1503.(Duan Zhuohua, Cai Zixing, Yu Jinxia. Robust measurement model for laser range finder, 2008, 20(6): 1500-1503.)
- [2] 何劲, 张群, 杨小优. 逆合成孔径成像激光雷达系统建模及成像仿真 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 632-637.(He Jin, Zhang Qun, Yang Xiaoyou. System modeling and imaging simulation of ISAIL. Journal of System Simulation 2012, 24(3): 632-637.)
- [3] 赵文, 韩绍坤. 3D 非扫描成像激光雷达距离精度的 Cramer-Rao 下限 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(5): 501-505.(Zhao Wen, Han Shaokun. Cramer-Rao lower bound for the range accuracy of 3D flash imaging lidar system. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(5): 501-505.)
- [4] 马晨宁, 赵文, 韩绍坤, 等. 条纹管成像激光雷达条纹数据提取算法 [J]. 中国激光, 2012, 39(4): 195-199. (Ma Chenning, Zhao Wen, Han Shaokun, Wang Ping. Data extraction algorithm for streak tube imaging lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 195-199.)
- [5] 魏靖松. 条纹管激光雷达成像技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (Wei Jinsong. Imaging technology of streak tube lidar [D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [6] Hubbard B E. Streak tube imaging LIDAR and the virtual periscope [C]// Proceedings of the 55th International Symposium & Exhibition (S0277-786X). USA: IOP Publishing Ltd., 2008: 9-24.
- [7] Richmond R D, Stephen C C. Direct-Detection LADAR Systems [B]. Bellingham, USA: SPIE Press, 2009: 15-25.
- [8] Goodman J W. Statistical Optics [B]. New York, USA: Wiley, 1985: 347-348.
- [9] Kriss M, Parulski K, Lewis D. Critical technologies for electronic still imaging systems [C]// Proceedings of Applications of Electronic Imaging (S0277-786X). USA, 1989: 157-183.