

文章编号:1671-6833(2019)03-0013-06

# 锚杆钻机转速的头脑风暴最优自抗扰控制

郭一楠<sup>1</sup>, 程伟<sup>1</sup>, 杨欢<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1,2</sup>, 陆希望<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学 信息与控制工程学院,江苏 徐州 221116; 2.山西潞安集团和顺李阳煤业有限公司,山西 长治 032701)

**摘要:**锚杆钻机作为巷道掘进支护的关键设备,其控制主要依赖于操作人员经验.不合理的钻机转速经常导致别杆、断杆等故障发生,大大降低了钻进效率.考虑到钻机回转系统固有的非线性和参数时变性,以及由多种因素引起的内外扰动,提出了锚杆钻机转速的头脑风暴最优自抗扰控制方法.该方法基于钻进围岩顶板条件,动态估计转速的给定值;为兼顾系统的动、稳态控制性能要求,采用头脑风暴优化算法实现自抗扰控制参数优化整定.基于 Matlab 和 AMESim 的联合仿真平台,面向单一围岩,考虑无扰和存在外部扰动的两种情况进行验证.实验表明,相比于已有最优 PID 控制方法,所设计的最优自抗扰控制器具有更好的动、稳态性能和更强的鲁棒性.

**关键词:**头脑风暴优化算法;自抗扰控制;钻机转速;围岩性状;参数整定

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.03.005

## 0 引言

锚杆钻机的性能直接决定了整个工程的进度和质量.钻机的执行机构由推进机构和回转机构两部分构成,二者协调配合,实现对岩石的破碎和钻进.

为实现钻机的高效工作,控制钻机的推进与回转过程是其核心问题.已有研究主要集中在利用推进力的自适应控制来适应岩层变化,从而提高钻机打眼效率<sup>[1]</sup>.然而,钻机在推进旋转破岩的过程中,除了推进力外,回转速度也会受到岩层性状的影响,这也会影响旋转切削和破岩钻孔效果,是提高锚固速度和效率的关键因素之一.目前,钻机转速的控制大都依据工程技术人员经验和意愿来实现,无法根据岩层性状自适应调节,不能实现钻机的高效运行,且关于回转速度自适应控制方法的相关研究较少.

由于锚杆钻机的推进回转机构采用液压油作为动力源,所以钻机控制系统本质上是电液控制系统.目前,电液系统的控制已日趋成熟. Alleyne A 等<sup>[2]</sup>采用 PID 控制解决了电液伺服系统的位

置和力跟踪问题.彭金柱等<sup>[3]</sup>提出基于 DRNN 网络的改进鲁棒控制方法,实现轮式机器人控制.针对液压系统固有的非线性和参数不确定, Guo 等<sup>[4]</sup>提出基于高增益观测器的输出反馈控制.该控制器在一定程度上能够保证系统的稳定性,但是控制性能会受到摩擦力和外负载干扰的影响.郭栋等<sup>[5]</sup>将自抗扰技术应用到钢坯闪光对焊中液压顶锻力控制,提高了系统的鲁棒性以及力伺服响应的速度.然而,锚杆钻机回转系统存在高度非线性、参数时变性与不确定性,这些都使回转系统控制困难.考虑到自抗扰控制器对系统扰动具有较好的抑制作用,笔者采用自抗扰控制器实现锚杆钻机转速的控制.

自抗扰控制器(active-disturbance-rejection control, ADRC)具有较多待整定参数,人工试凑法耗时,且无法兼顾控制系统的各方面要求.李述清等<sup>[6]</sup>提出利用系统时间尺度的控制器参数整定方法,推导出二阶系统的时间尺度参数整定计算公式.但是,该方法仅针对二阶系统,具有一定局限性,且算法复杂度较高.李海生等<sup>[7]</sup>和刘丁等<sup>[8]</sup>分别采用基于惩罚策略的浮点遗传优化算法和自

收稿日期:2018-10-30;修订日期:2018-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(61573361);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046306-6);江苏省六大高峰人才项目(2017-DZXX-046)

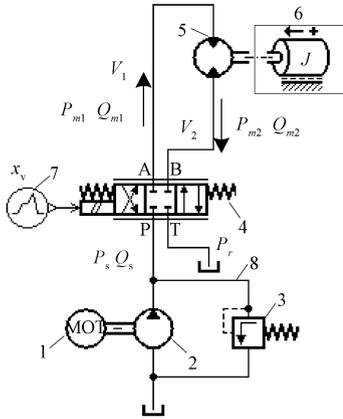
作者简介:郭一楠(1975—),女,山西太原人,中国矿业大学教授,博士,主要从研究方向为智能优化与控制,数据挖掘与知识发现, E-mail: nanfly@163.com.

适应遗传算法,实现自抗扰控制器的寻优.

Shi<sup>[9]</sup>于2011年提出头脑风暴优化(brain storm optimization,BSO)算法,它模拟人类头脑风暴会议过程,能够较好平衡全局搜索和局部搜索能力,目前已在直流无刷电机优化设计、多卫星编队、螺线管优化等诸多优化问题上取得了成功.同时,算法的分类机制和个体更新方法大大提高了粒子的搜索能力.该机制表明,BSO算法在其他优化领域同样具有巨大的应用潜力.基于此,笔者提出基于头脑风暴算法的自抗扰控制器参数整定策略,并将其用于钻机回转速度控制.

## 1 锚杆钻机回转系统建模

锚杆钻机回转系统的基本组成如图1所示.



1.异步电机,2.定量泵,3.安全阀,4.三位四通电液比例阀,5.液压马达,6.负载,7.阀控制信号,8.油箱

图1 钻机回转系统原理图

Fig.1 The schematic diagram of the rotating system

一台异步电机带动定量泵旋转,使泵出油液经过三位四通电液比例阀,进入锚杆钻机液压马达,控制钻机马达正/反转,从而实现钻杆的钻进和退回.通过改变比例阀开度并调节液压马达输入流量,进而控制钻机转速.

系统核心参数如表1所示.系统压力由泵出口位置安装的16 MPa安全阀提供,钻机转速通过改变比例阀开度进行控制.通过分析液压马达和三位四通电液比例阀两个核心部件的动态、静态传递函数关系,建立锚杆钻机回转系统数学模型.

三位四通电液比例阀根据输入的电流控制信号  $i_v$ ,产生阀芯相应位移  $x_v$ ,通过阀口流量  $Q_v$  改变负载流量大小  $Q_L$ .记  $P_L = P_{m1} - P_{m2}$ ,其阀口流量  $Q_v$  满足:

$$x_v = k_v i_v; \quad (1)$$

$$Q_v = C_d W_v x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - P_L)}. \quad (2)$$

表1 钻机回转系统核心部件相关参数及含义  
Tab.1 The anchor-hole drill rotary system core components related parameter and its meaning

| 关键部件   | 参数   | 含义                                      |         |
|--|--|---|---------|
| 三位四通电液比例阀  | $P_s/\text{MPa}$                             | 回转系统供油压力                                |         |
|  | $P_L/\text{MPa}$                             | 负载压力                                    |         |
|  | $P_{m1}/\text{MPa}$                          | 马达进油腔压力                                 |         |
|  | $P_{m2}/\text{MPa}$                          | 马达回油腔压力                                 |         |
|  | $C_d$  | 流量系数                                    |         |
|  | $W_v/\text{m}$                               | 阀面积梯度                                   |         |
|  | $k_v$  | 电液比例阀放大系数                               |         |
|  | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$         | 油液密度                                    |         |
|  | 液压马达   | $\theta_m/\text{rad}$                   | 液压马达转角  |
|  |  | $Q_{m1}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$ | 马达进油腔流量 |
| $C_{mi}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ |  | 马达内泄漏系数                                 |         |
| $V_1/\text{m}^3$                                   |  | 马达进油腔和进油管道的可控容积                         |         |
| $\beta_e/(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$             |  | 油液有效体积弹性模量                              |         |
| $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$                     |  | 马达轴等效总惯量                                |         |
| $D_m/(\text{m}^3\cdot\text{r})$                    |  | 液压马达排量                                  |         |
| $Q_{m2}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$            |  | 马达回油腔流量                                 |         |
| $C_{me}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ |  | 马达外泄漏系数                                 |         |
| $V_2/\text{m}^3$                                   |  | 马达回油腔和回油管道的可控容积                         |         |
|  | $M_L/(\text{N}\cdot\text{m})$                | 负载转矩                                    |         |
|  | $B_m/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{rad})$ | 液压黏性阻尼系数                                |         |

为便于分析,对上述非线性阀口流量关系进行线性化处理<sup>[10]</sup>,简化为:

$$Q_v = K_q x_v - K_c P_L. \quad (3)$$

液压马达将液压泵提供的液体压力动能转变为其输出轴的机械能(转速或转矩).在回转系统中,根据流量的连续性,建立液压马达的动态微分方程<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{V_1}{\beta_e} \dot{P}_{m1} = Q_{m1} - D_m \dot{\theta}_m - C_{mi}(P_{m1} - P_{m2}) - C_{me} P_{m1}; \\ \frac{V_2}{\beta_e} \dot{P}_{m2} = -Q_{m2} + D_m \dot{\theta}_m + C_{mi}(P_{m1} - P_{m2}) - C_{me} P_{m2}, \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V_1 = V_{01} + D_m \theta_m$ ,  $V_2 = V_{02} - D_m \theta_m$ .  $V_{01}$  和  $V_{02}$  分别为两腔初始容积,满足  $V_{01} = V_{02} = V_0$ .负载流量满足:

$$Q_L = \frac{Q_{m1} + Q_{m2}}{2}. \quad (5)$$

联立式(4)和式(5),得

$$Q_L = D_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{2\beta_e} (V_{01} \dot{P}_{m1} - V_{02} \dot{P}_{m2}) + \frac{D_m \theta_m}{2\beta_e} (\dot{P}_{m1} + \dot{P}_{m2})$$

$$\dot{P}_{m2}) + \left( C_{mi} + \frac{C_{mc}}{2} \right) (P_{m1} - P_{m2}). \quad (6)$$

令  $C_{tm}$  为液压马达总泄漏系数, 满足  $C_{tm} = (C_{mi} + C_{mc})/2$ ;  $V_1$  为液压马达两腔及连接管道的总压缩容积, 满足  $V_1 = 2V_0$ ; 由于  $P_s = P_{m1} + P_{m2}$ , 所以  $\dot{P}_{m1} + \dot{P}_{m2} = 0$ , 则简化式(6)为:

$$Q_L = D_m \dot{\theta}_m + \frac{V_1}{4\beta_e} \dot{P}_L + C_{tm} P_L. \quad (7)$$

根据牛顿第二定律, 建立上述阀控液压马达系统的负载动力学模型为:

$$D_m P_L = J_L \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + M_L. \quad (8)$$

通常, 由于马达的外泄漏量较小, 所以在忽略马达外泄漏量条件下, 负载流量近似等于阀口流量, 即  $Q_L = Q_V$ . 由此, 结合式(3)、式(7)和式(8), 记  $K_{ce} = K_c + C_{tm}$  为总的流量压力系数, 得到锚杆钻机回转系统传递函数为:

$$\dot{\theta}_m = \frac{\frac{K_q k_v}{D_m} i_v - \frac{K_{ce}}{D_m^2} \left( 1 + \frac{V_1}{4\beta_e K_{ce}} s \right) M_L}{\frac{J_L V_1}{4\beta_e D_m^2} s^2 + \left( \frac{J_L K_{ce}}{D_m^2} + \frac{B_m V_1}{4\beta_e D_m^2} \right) s + \left( 1 + \frac{B_m K_{ce}}{D_m^2} \right)}. \quad (9)$$

由式(9)可知, 钻机回转系统是一个存在非线性及时变因素, 以及多类干扰的典型二阶系统.

## 2 锚杆钻机转速最优自抗扰控制

自抗扰控制系统的控制器设计不依赖于系统具体模型, 只需考虑系统的相对阶数, 设计简单. 因此, 笔者给出一类钻机转速的自抗扰控制策略. 然而, 由于自抗扰控制器待整定参数较多, 人工整定耗时且效果不佳, 所以提出一种基于头脑风暴算法的自抗扰控制器参数自整定方法. 另外, 根据钻进岩层条件来估算最优转速, 作为自抗扰控制器的设定值, 提供其转速跟踪依据. 锚杆钻机转速的最优自抗扰控制系统框图如图2所示.

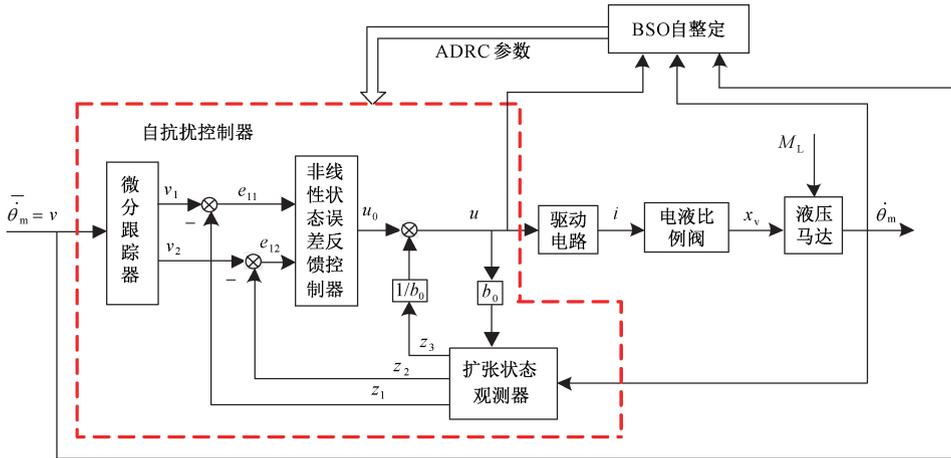


图2 锚杆钻机回转系统控制框图

Fig.2 The control block diagram of the rotating system in anchor-hole drills

### 2.1 最优转速获取

根据比留柯夫的研究可知, 针对某一类岩石, 存在一个最优回转转速, 且该最优转速与岩石普氏硬度系数和钻杆直径的平方根乘积成反比<sup>[11]</sup>. 在该转速下, 可得到最大的钻进速度. 当回转转速超过其最优值时, 随着回转转速增大, 钻刃切削时的岩石变形得不到充裕时间向前传递, 已破碎下来的岩屑来不及排除而造成重复破碎, 钻进速度反而降低, 造成钻杆严重损坏.

令  $D$  为钻头直径,  $c$  为切削速度常数,  $f$  为岩石硬度系数, 则钻机最优回转速度  $\dot{\theta}_m$  为:

$$\dot{\theta}_m = \frac{c}{f\sqrt{D}}. \quad (10)$$

### 2.2 自抗扰控制器结构

自抗扰控制器主要由三个部分组成<sup>[12]</sup>: 微分跟踪器 (tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器 (expansion state observer, ESO) 和非线性状态误差反馈控制器 (nonlinear state error feedback, NLSEF), 如图2所示.

微分跟踪器用于生成合理的过渡过程, 提取相应的微分信号. 假设  $R$  为被控量给定值,  $v_1$  和  $v_2$  分别为  $R$  在过渡过程中的期望序列及其一阶微分,  $h$  为采样步长,  $h_0$  为滤波因子,  $fhan()$  为最优控制函数<sup>[12]</sup>. 由此, 建立微分跟踪器模型为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k); \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hf(k); \\ f(k) = fhan(v_1(k) - R(k), v_2(k), r, h_0). \end{cases} \quad (11)$$

令  $z_1$  和  $z_2$  为状态变量,  $z_3$  为总干扰量, 扩张状态观测器用于实时估计内外扰动总和.

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k)); \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fal(e(k), 0.5, \delta) + b_0u(k)); \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h(-\beta_{03}fal(e(k), 0.25, \delta)); \\ e(k) = z_1(k) - y(k). \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $fal()$  为非线性函数<sup>[12]</sup>; 观测器增益  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$  和参数  $b_0$  为待整定参数.

$fal()$  为非线性函数,

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-a}}, & |e| \leq \delta; \\ |e|^a \text{sign}(e), & |e| > \delta. \end{cases} \quad (13)$$

非线性状态误差反馈控制率用于对 TD 和 ESO 的输出量进行非线性组合, 并对总干扰进行补偿, 记为:

$$\begin{cases} u(k) = u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b_0}; \\ u_0(k) = \beta_{11}fal(e_1(k), a_1, \delta_1) + \beta_{12}fal(e_2(k), a_2, \delta_1); \\ e_1(k) = v_1(k) - z_1(k); \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k), \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\beta_{11}$  和  $\beta_{12}$  为控制器的比例增益和微分系数;  $u_0$  为非线性反馈输出; 非线性系数  $a_1$ 、 $a_2$  满足  $0 < a_1 < 1 < a_2$ , 本文选取  $a_1 = 0.75$ ,  $a_2 = 1.25$ ;  $\delta_1 = 0.001$ .

### 2.3 自抗扰控制器参数的头脑风暴整定方法

自抗扰控制器中, ESO 的  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$  和  $b_0$ , 以及 NLSEF 的  $\beta_{11}$  和  $\beta_{12}$ , 都会对回转速度的控制性能产生影响. 因此, 采用头脑风暴优化算法对上述参数进行整定, 以获得满意的控制效果.

由于自抗扰控制器中待整定参数均为实数, 所以进化个体  $x_i = (\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_{11}, \beta_{12}, b_0)$  采用实数编码<sup>[13]</sup>. 采用时间乘绝对误差积分准则这一综合控制性能指标作为目标函数<sup>[14]</sup>. 另外, 由于转速调节在实际系统中不允许超调, 所以在目标函数中增加了系统超调量. 记系统的瞬时误差为  $e(t)$ , 超调量为  $M_p$ , 时间乘绝对误差和超调量之间的权值为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ , 得到综合目标函数为:

$$J = \int_0^{\infty} (\omega_1 t |e(t)| + \omega_2 |M_p|) dt. \quad (15)$$

头脑风暴算法的核心在于通过变异算子生成新个体. 记  $x_{ij}(t)$  和  $\overline{x}_{ij}(t)$  分别为第  $i$  个个体的第  $j$  维变量变异前后的取值,  $\lambda \sim N(\mu, \sigma)$  为服从高斯分布的随机数,  $\beta \sim U(0, 1)$  为服从均匀分布的随机数,  $\xi(t)$  为变异尺度,  $c$  为斜率.  $t$  和  $T$  分别为进化代数和最大迭代次数, 则变异算子为:

$$\overline{x}_{ij}(t) = x_{ij}(t) + \xi(t)\lambda; \quad (16)$$

$$\xi(t) = \log \text{sig} \left( \frac{0.5T - t}{c} \right) \beta. \quad (17)$$

基于头脑风暴优化算法的自抗扰控制器参数整定方法的具体流程如下.

**Step 1** 初始化. 随机生成  $n$  个个体, 构成种群.

**Step 2** 评价. 将每个个体所对应的自抗扰控制器参数, 代入钻机转速控制系统, 仿真运行获得其目标值.

**Step 3** 聚类. 采用  $k$ -means 聚类算法, 将  $n$  个个体聚为  $m$  个类, 依据每个个体的目标值, 对每个类中个体排序, 选取具有最佳目标值的最优个体作为聚类中心; 产生随机数  $R_1 \in [0, 1]$ , 判断是否满足  $R_1 < P_1$ . 如果满足, 则随机选择一个聚类中心; 否则, 随机生成一个个体替代该聚类中心.

**Step 4** 变异. 产生随机数  $R_2 \in [0, 1]$ , 判断是否满足  $R_2 < P_2$ . 如果满足, 则执行 Step 4.1; 否则, 执行 Step 4.2.

**Step 4.1** 随机选择一个类, 依据随机数  $R_3 \in [0, 1]$ , 判断是否满足  $R_3 < P_3$ . 如果满足, 则依据该类的中心, 通过变异产生新个体; 否则, 从该类中随机选择一个个体, 通过变异产生新个体.

**Step 4.2** 随机选择两个类, 依据随机数  $R_4 \in [0, 1]$ , 判断是否满足  $R_4 < P_4$ . 如果满足, 则依据两类中心, 通过变异产生新个体; 否则, 从两类中各随机选择一个个体, 通过变异产生新个体.

**Step 4.3** 如果新生成个体优于原有个体, 则采用新个体替代原有个体.

**Step 5** 如果达到最大迭代次数, 则终止进化, 并输出全局最优解作为控制系统最优参数; 否则, 跳转到 Step 2.

## 3 实验仿真与结果分析

为验证笔者所设计的锚杆钻机最优自抗扰控制策略的有效性, 采用 AMESim 和 Matlab 联合仿

真平台搭建控制系统,如图 3 所示. AMESim 用于锚杆钻机回转系统的物理模型搭建, Matlab 实现基于头脑风暴的转速最优自抗扰控制算法. 设定头脑风暴优化算法参数如表 2 所示. 针对表 3 所示晋城寺河矿巷道顶板岩石状况<sup>[15]</sup>, 实验分析了锚杆钻机在单一围岩钻进时所提控制器性能, 验证了岩层性状波动情况下所提控制器的鲁棒性.

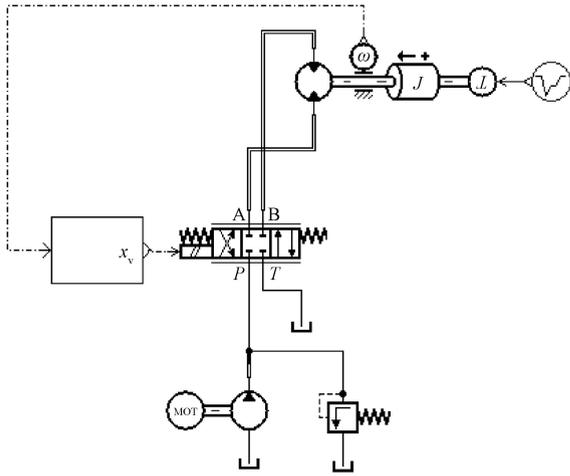


图 3 锚杆钻机回转系统的联合仿真平台

Fig.3 The joint simulation platform of the anchor drilling's rotary system

表 2 头脑风暴优化算法参数

Tab.2 Parameters of BSO algorithm

| $n$ | $m$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $c$ | $T$ |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| 100 | 5   | 0.2   | 0.8   | 0.4   | 0.5   | 20  | 100 |

表 3 晋城寺河矿巷道顶板围岩性状

Tab.3 The properties of the rock stratum in JinCheng SiHe coal mine

| 岩性   | 累计厚度 /m | 厚度 /m | 抗压强度 /MPa | 岩石硬度系数 | 岩性描述                        |
|------|---------|-------|-----------|--------|-----------------------------|
| 砂质泥岩 | 10.00   | 3.67  | 45.2      | 5      | 局部夹有薄层砂岩, 结构面少, 较完整         |
| 细砂岩  | 6.33    | 1.10  | 114.9     | 12     | 结构面不发育, 完整性好, 坚硬            |
| 中砂岩  | 4.91    | 0.55  | 72.8      | 8      | 岩层完整, 比较坚硬                  |
| 砂质泥岩 | 4.36    | 2.96  | 31.5      | 4      | 层理发育, 比较破碎                  |
| 煤层   | 1.40    | 1.40  | 21.9      | 3      | 厚度稳定, 性脆, 内生裂隙发育, 含 1~4 层夹矸 |

### 3.1 单一围岩条件下最优转速跟踪性能

以巷道顶板最常见的砂质泥岩为例, 其岩石硬度系数为  $f=5$ . 由此根据式 (10), 得到砂质泥岩

的钻机最优旋转速度  $\bar{\theta}_m = 408 \text{ r/min}$ . 采用头脑风暴优化算法, 分别对自抗扰控制器和传统 PID 控制器进行参数寻优.

设定待整定参数的搜索范围:  $\beta_{01} \in (0, 300)$ ,  $\beta_{02} \in (0, 1\ 000)$ ,  $\beta_{03} \in (0, 1\ 000)$ ,  $\beta_{11} \in (0, 700)$ ,  $\beta_{12} \in (0, 50)$ ,  $b_0 \in (0.01, 10)$ ,  $k_p \in (0.1, 200)$ ,  $k_i \in (0.1, 0.8)$ ,  $k_d \in (0.1, 5)$ .

依照图 4 所示的头脑风暴优化算法参数寻优过程, 获得控制器整定参数. ① BSO-ADRC:  $r = 9\ 965.254\ 8$ ,  $h_0 = 0.005\ 2$ ,  $\beta_{01} = 30.036\ 1$ ,  $\beta_{02} = 1\ 000$ ,  $\beta_{03} = 0.021$ ,  $\beta_{11} = 485.672\ 5$ ,  $\beta_{12} = 0$ ,  $b_0 = 5.647\ 1$ ; ② BSO-PID:  $k_p = 105.264\ 7$ ,  $k_i = 0.103\ 3$ ,  $k_d = 2.996\ 4$ .

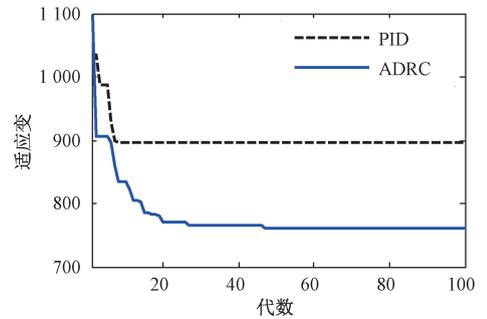


图 4 基于 BSO 的控制器参数寻优过程

Fig.4 The evolution process of BSO-based controller

设定控制器参数为寻优获得的最优参数, 得到单一围岩条件下的转速控制性能, 如图 5 所示.

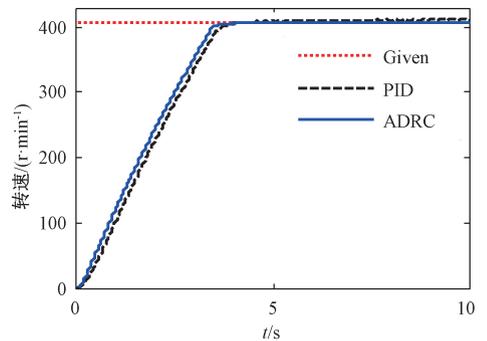


图 5 转速控制性能比较

Fig.5 Comparison of controllers performances

由如图 4 可知, 相比于 PID 控制参数寻优过程, ADRC 控制参数寻优过程较慢. 这是因为, 设定的 PID 控制参数搜索范围是依据经验整定方法获得的, 且待整定参数维度较小. 由图 5 和表 4 可见, 最优自抗扰控制器具有比最优 PID 控制器更好的控制性能. 特别是在无扰动情况下, 自抗扰控制器能够很好地满足钻进过程中响应快速且无超调的控制要求. 另外, 最优 PID 控制器不仅具有较差的动、稳态性能, 其综合控制性能 (如图 4 所

示)也劣于最优自抗扰控制器的控制性能。

表4 ADRC与PID控制性能对比

Tab.4 Comparison of ADRC and PID control performance

| 控制性能            | 单一围岩(无扰动) |       | 单一围岩(有扰动) |       |
|-----------------|-----------|-------|-----------|-------|
|                 | ADRC      | PID   | ADRC      | PID   |
| 上升时间 $t_r/s$    | 3.129     | 3.281 | —         | —     |
| 超调量 $\delta/\%$ | 0         | 1.23  | 1.86      | 20.25 |
| 调节时间 $t_s/s$    | 3.477     | 3.695 | 0         | 0.96  |
| 稳态误差 $e_{ss}$   | 0.31      | -5.1  | 0.54      | -3.43 |

### 3.2 转速最优自抗扰控制器鲁棒性能

钻进过程存在诸多干扰因素,为验证所提控制策略的鲁棒性,在单一砂质泥岩的巷道围岩条件下,当  $t=10\text{ s}$  时,给系统加入  $15\text{ N}\cdot\text{m}$  的干扰,转速跟踪性能如图6所示。

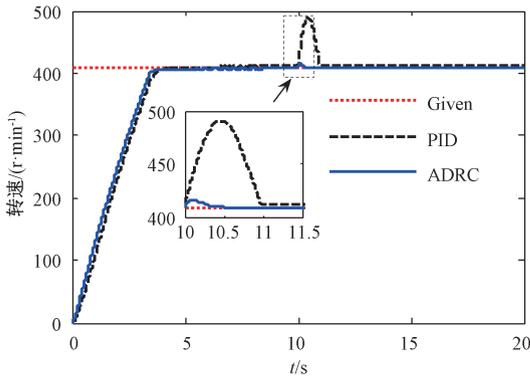


图6 干扰下的转速控制性能

Fig.6 The control performance of rotary speed under disturbance

由图6和表4可见,当突加外部干扰时,PID控制器瞬间产生较大超调,且需要经过1s左右,才能追踪到原设定转速,鲁棒性较差,不利于钻机运行.相比而言,自抗扰控制器在受到外部扰动时,超调量小于2%稳态值,表明其具有较强鲁棒性;并且,其稳态性能也优于PID控制器,控制更加精确.因此,自抗扰控制具有较好的抗干扰能力,能更好地满足锚杆钻机这种存在多类外部干扰的实际系统的控制需求。

## 4 结论

锚杆钻机转速的自适应调节是改善钻进效率和钻孔质量的关键因素.因此,笔者提出基于头脑风暴优化算法的钻机转速最优自抗扰控制方法.首先,根据回转系统组成建立其数学模型,经线性化处理,确定回转系统模型为二阶.其次,根据钻进的顶板围岩性状,估算不同围岩的最佳转速,作为自抗扰控制器的给定信号.由于钻机回转系统具有高度非线性、参数时变特性以及多种内外部扰动,

所以采用自抗扰控制器,并采用头脑风暴优化算法,对6个控制参数进行寻优,得到最佳的动、稳态性能.最后,基于Matlab和AMESim的联合仿真平台的验证可知,相比于传统PID控制器,笔者提出的控制方法具有更加优越的动、稳态性能和更强鲁棒性,为实现可靠稳定的巷道掘进支护提供了实现基础.锚杆钻机利用推进系统和回转系统的协调配合完成钻孔工作,因此,推进回转协同控制策略的实施将是后续工作的核心。

## 参考文献:

- [1] 胡志坚,彭嵩,耿莉.工程地质钻机回转钻进比例控制系统的模拟分析[J].机床与液压,2009,37(10):219-221.
- [2] ALLEYNE A, LIU R. On the limitations of force tracking control for hydraulic servosystems[J]. Journal of dynamic systems, measurement & control, 1999, 121(2):184-190.
- [3] 彭金柱,卞英楠,周树亮.基于DRNN网络的轮式机器人鲁棒  $H_\infty$  控制[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(4):64-69.
- [4] GUO Q, YU T, JIANG D. High-gain observer-based output feedback control of single-rod electro-hydraulic actuator[J]. IET control theory & applications, 2015, 9(16):2395-2404.
- [5] 郭栋,付永领,卢宁,等.自抗扰控制技术在电液力伺服系统中的应用[J].北京航空航天大学学报,2013,39(1):115-119.
- [6] 李述清,张胜修,刘毅男,等.根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数[J].控制理论与应用,2012,29(1):125-129.
- [7] 李海生,朱学峰.自抗扰控制器参数整定与优化方法研究[J].控制工程,2004,11(5):419-423.
- [8] 刘丁,刘晓丽,杨延西.基于AGA的ADRC及其应用研究[J].系统仿真学报,2006,18(7):1909-1911.
- [9] SHI Y H. Brain storm optimization algorithm [C]// ICSI'11 Proceedings of the Second International Conference on Advances in Swarm Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011:303-309.
- [10] YANG F G, LI Y B, RUAN J H, et al. ADRC based study on the Anti-braking system of electric vehicles with regenerative braking [C]//2010 8th Word Congress on Intelligent Control and Automation. Jinan: IEEE, 2010:2588-2593.
- [11] 贺立军.新型全液压多功能锚杆钻机关键技术的研究[D].武汉:中国地质大学信息与控制工程学院,2010.
- [12] 韩京清.自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

(上接第 18 页)

- [13] GUO Y N, CHENG J, CAO Y Y, et al. A novel multi-population cultural algorithm adopting knowledge migration[J]. Soft computing, 2011, 15(5):897-905.
- [14] 曹奔, 袁忠于, 刘洪. 基于粒子群算法的烧结炉系

统辨识及神经网络控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(5):39-43.

- [15] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2007.

## An Optimal Active-disturbance-rejection Controller for the Rotary Speed of An Anchor-hole Drill Based on Brain Storm Optimization Algorithm

GUO Yinan, CHENG Wei, YANG Huan, YANG Fan, LU Xiwang

(1.School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Shanxi Luan Heshun Li Yang Coal Industry Co., Ltd, Changzhi 032701, China)

**Abstract:** As the key equipment of tunneling a roadway, controlling the anchor-hole drills mainly depends on the operator's rich controlling experience. Improper rotary speed of an anchor-hole drill generally resulted in sticking or breaking pipes, which would reduce the drilling efficiency. Especially, the nonlinearities and time-varying parameters, as well as the disturbances resulted from various factors in the anchor-hole drill rotary system should be taken into consideration. A novel optimal active-disturbance-rejection controller was proposed in the paper. The set value of the rotary speed was dynamically estimated in terms of the geological condition of surrounding rocks. Brain storm optimization algorithm was employed to find the optimal parameters of the controller, which could have the best dynamic and steady control performances. Based on the simulation platform composed of AMESim and Matlab, the experimental results for a single surrounding rock with or without the external disturbance showed that the proposed ADRC controller has better dynamic and steady performances and stronger robustness than the optimal PID controller.

**Key words:** brain storm optimization algorithm; active-disturbance-rejection control; the rotary speed of anchor-hole drills; geological condition of surrounding rocks; parameter tuning