

# 基于灰色预测控制的石油自动送钻钻压控制系统

焦 洁<sup>1</sup>, 田翠侠<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 上海大学, 上海 200072)

**摘要:**针对自动送钻控制系统中存在的时变、时滞和非线性条件下难以实现准确控制的情况,提出了一种灰色预测控制算法,该控制算法在建模过程中对原始数据进行累加生成,而这样累加的结果可以大大弱化非线性干扰的影响。利用灰色预测改进模型,实行一步或多步预测,将预测误差与误差变化作为决策机构的输入,送给液压调速系统对绞车的绞车力进行控制,然后控制钻杆的下放速度从而达到恒钻压的目的。该算法自适应性强,计算简单,适合于钻压控制系统中。仿真结果表明,该算法是有效的。

**关键词:**预测控制;石油钻井;自动送钻钻压控制系统;GM(1,1)模型

**中图分类号:**P634.9   **文献标识码:**A   **文章编号:**1672-7428(2008)02-0021-03

**Bit Pressure Control System of Automatic Petroleum Drill Bit Feeding Based on Grey Forecasting/JIAO Jie<sup>1</sup>, TIAN Cui-xia<sup>2</sup>** (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** According to the control difficulties in bit pressure control system of auto-drilling, such as time-variant, time-lag, nonlinear condition, a grey prediction control algorithm was proposed, it creates a sequence by accumulating original data, and then the result of accumulation may greatly weaken the influence of nonlinear disturbance. Based on the modified grey prediction model, one or multi-step prediction can be taken to put predicting errors and error variation into hydraulic speed regulation system to control the pressure of winch, then control the running-down speed of drill pipe to obtain constant bit pressure.

**Key words:** prediction control; petroleum drilling; bit pressure control system of auto-drilling; GM(1,1) model

传统的自动送钻控制系统都采用 PID 控制技术,它具有结构简单、可靠、稳定等特点,但它常不能有效克服负载、模型参数的大范围变化及其非线性因素的影响,因而在自动送钻这种时变、时滞和非线性条件下难以实现准确控制的系统中不能满足要求。将灰色预测控制直接用于自动送钻控制系统中可以充分体现预测控制的“超前控制”的功能,提前补偿误差,减少超调,适用于非线性、滞后系统的控制。由于不需要建立被控制对象的精确模型,因而设计较方便。

## 1 自动送钻钻压控制系统

自动送钻控制系统要求根据井底钻头钻压的变化,适时地进行调节,同时保证在安全、经济的条件下运行。见图 1。

图 1 中外环是钻压调节部分,这里钻压调节器根据给定钻压  $r(k)$  和实际钻压的偏差算出一个速度的给定值  $V_1$ ; 该速度给定值  $V_1$  送入中环,中环是

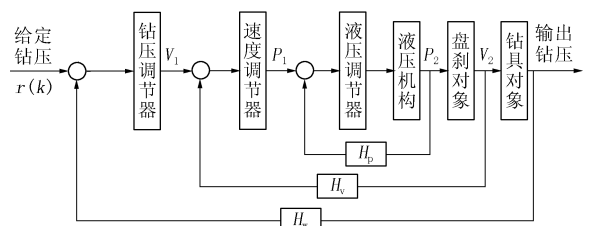


图 1 自动送钻钻压控制系统

速度调节部分,在此环  $V_1$  与实际速度  $V_2$  的偏差经过运算后输出一个液压系统的压力给定值  $P_1$ ,中环保证输出的速度  $V_2$  与给定速度  $V_1$  相同; 液压给定值  $P_1$  送入内环,内环是液压压力调节部分,该部分保证液压机构输出的实际压力  $P_2$  与给定压力  $P_1$  相同。于是在给定速度  $V_1$  的情况下,输出钻压就会与给定钻压相同,从而达到恒钻压控制的目的。

## 2 灰色预测模型 GM(1,1)

### 2.1 GM(1,1) 预测模型

在灰色系统理论中,GM(1,1)模型是根据关联

收稿日期:2007-10-11

作者简介:焦洁(1981-),男(汉族),安徽亳州人,中国地质大学(武汉)硕士研究生在读,钻井工程专业,研究方向为定向钻井与随钻测量技术,湖北省武汉市中国地质大学 1200532 班,stealjoy@163.com;田翠侠(1981-),女(汉族),安徽太和人,上海大学硕士研究生在读,机械设计及其自动化专业,研究方向为灰色控制在液压伺服中的应用,上海市闸北区延长路 149 号上海大学 M5 楼 207 室。

度、生成数的灰导数以及灰微分等观点建立起来的微分方程,灰色预测是建立在 GM(1,1)模型基础上的。

设原始数据序列为  $x^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots$ , 作一次累加生成  $x^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i x^{(0)}(k)$ 。

根据梯形公式,有如下的近似式:

$$x^{(1)}(k+1) = x^{(1)}(k) + \frac{1}{2} \left[ \frac{dx^{(1)}(k)}{dt} + \frac{dx^{(1)}(k+1)}{dt} \right]$$

由于  $x^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k)$ , 有:

$$\hat{\theta} = (B^T B)^{-1} B^T \gamma$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)}{2} & -\frac{x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)}{2} & \dots & -\frac{x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)}{2} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\gamma = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(N)]^T; \theta = [\hat{a} \quad \hat{u}]^T$$

### 2.2 改进的 GM(1,1)模型

以上过程是从微分近似的角度来看传统方法。然而事实上取  $\Delta t = 1$ , 还可以对导数项作如下近似:

$$\frac{dx^{(1)}(k)}{dt} = \frac{x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k-1)}{2}$$

$$= [x^{(0)}(k+1) + x^{(0)}(k-1)]/2$$

相应地有模型误差:

$$V = \begin{bmatrix} -x^{(1)}(2) & -x^{(1)}(3) & \dots & -x^{(1)}(N-1) & -\frac{x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)}{2} & -\frac{x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)}{2} & \dots & -\frac{x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)}{2} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{x^{(0)}(2) + x^{(0)}(3)}{2} & \frac{x^{(0)}(3) + x^{(0)}(4)}{2} & \dots & \frac{x^{(0)}(N-1) + x^{(0)}(N)}{2} & x^{(0)}(2) & x^{(0)}(3) & \dots & x^{(0)}(N) \end{bmatrix}$$

$$\hat{\theta} = [\hat{a} \quad \hat{u}]^T$$

继续计算  $a, u$  的最小二乘公式可得:

$$\hat{a} = \frac{V_2 Z_1 - s Z_2}{V_1 V_2 - S^2}, \hat{u} = \frac{V_1 Z_2 - s Z_1}{V_1 V_2 - S^2}$$

式中:

$$V_1 = \sum_{k=2}^{N-1} x_1^2 + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^N [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)]^2$$

$$S = -\sum_{k=2}^{N-1} x^{(1)}(k) + \frac{1}{2} \left[ \sum_{k=1}^{N-1} x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1) \right]$$

$$Z_1 = -\frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=2}^{N-1} x^{(1)}(k) [x^{(0)}(k) + x^{(0)}(k+1)] + \sum_{k=1}^{N-1} x^{(0)}(k+1) [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)] \right\}$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{N-1} [x^{(0)}(k) + x^{(0)}(k+1)] + \sum_{k=2}^N x^{(0)}(k)$$

$$\frac{dx^{(1)}(k)}{dt} + \frac{dx^{(1)}(k+1)}{dt} = 2x^{(1)}(k+1)$$

令  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ , 得到  $N$  个方程, 对  $N$  个方程用第  $k$  个方程加上第  $k+1$  个方程得到如下  $N-1$  个模型误差方程:

$$e(k) = x^{(0)}(k) + (a/2)[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)] - u, (k = 2, 3, \dots, N)$$

由最小二乘法得到对参数  $a, u$  的估计:

$e(k) = (1/2)[x^{(0)}(k+1) + x^{(0)}(k)] + ax^{(1)}(k) - u$   
令  $k = 2, 3, \dots, N-1$ , 极小化如下目标函数  $J = E^T E$ 。

其中  $E = (e_2 e_3 \dots e_{n-1} \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{N-1})^T$ 。

得到新的估计  $a, u$  的最小二乘公式:

$$\hat{\theta} = (V^T V)^{-1} V^T Z$$

式中:

于是得到原方程的近似解在采样时刻的值:

$$x^{\wedge(0)}(k) = [x^{(0)}(1) - (\hat{u}/\hat{a})] e^{-ak} + (\hat{u}/\hat{a})$$

根据上式, 可以进行  $(k+m)$  时刻的预测, 然后对累加后的数据还原, 得到原始数据对  $(k+m)$  时刻的预测为:

$$x^{(0)}(k+m) = [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] (1 - e^{-a}) e^{-a(k+m-1)}$$

根据上式, 如果将第  $(k+m)$  时刻采样点上求得的  $x^{(0)}(k+m)$ , 记为  $x_m^{\wedge(0)}(k+m)$ , 则  $x_m^{\wedge(0)}(k+m)$  随着  $k$  及  $m$  变化。当  $m > 0$  时,  $x_m^{\wedge(0)}(k+m)$  就是在第  $(k+m)$  时刻预测的未来  $m$  个点上的预测值。

### 3 灰色预测控制系统

自动送钻系统是一个多变量、时变、时滞、非线性的系统,很难用一个具体的表达式表示,而且由于常规控制中,参数是恒定的,所以对于有大扰动的自动送钻系统来说,控制效果不是很好,于是本文提出了将灰色预测控制理论应用在自动送钻控制系统中。

图 2 中,  $r(k)$  为  $k$  时刻系统给定;  $x^{(0)}(k)$  为  $k$  时刻系统输出;  $\hat{x}_k^{(0)}(k+m)$  为超前  $m$  步的灰色预测值。  $e(k) = r(k) - x^{(0)}(k)$  为系统  $k$  时刻的实际误差;  $\hat{e}(k) = r(k) - \hat{x}_k^{(0)}(k+m)$  为预测误差。因此,根据  $e(k)$  和  $\hat{e}(k)$  首先确定参与 PID 调节算法的误差项  $\hat{e}(k)$ 。  $\hat{e}(k)$  的求取是根据  $e(k)$  和  $\hat{e}(k)$  的方向作两种不同的运算得到的:

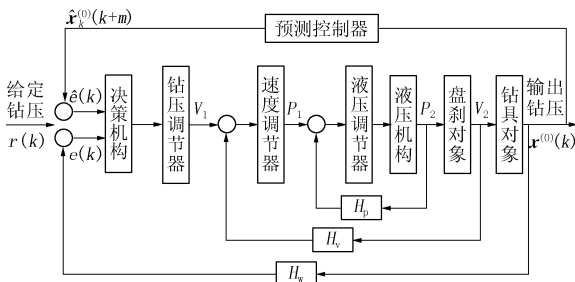


图 2 灰色预测应用在自动送钻钻压控制系统中

$$\hat{e}(k) = \begin{cases} \hat{e}(k) & e(k)\hat{e}(k) \geq 0 \\ (1/2)[e(k) + \hat{e}(k)] & e(k)\hat{e}(k) < 0 \end{cases}$$

以上说明,当  $e(k)\hat{e}(k) < 0$  时,说明系统的波动已在给定值附近变化,此时应取谨慎的控制策略。当  $e(k)\hat{e}(k) \geq 0$  时,则以  $\hat{e}(k)$  为误差进行调节,从而有效抑制系统可能出现的超调。

### 4 仿真分析

如果取内环的液压力调节部分的开环传递函数为  $G_1(s) = \frac{2.4}{(0.16s + 1)(0.004s + 1)}$ ; 速度调节部分的传递函数为  $G_2(s) = \frac{16.5(s + 1.06)}{s}$ ; 钻压调节部分的传递函数为  $G_3(s) = 4.2$ 。

取实际钻井过程中大钩应产生的提升力为  $F_1 = 294000$  N, 与之对应的液压系统输出的压力应为  $F_2 = 8521.739$  N。为了简化算法与程序,图 2 中的  $H_p$  和  $H_w$  均取 1,所以内外两个控制环都是单位反馈环。

预测控制系统在阶跃信号和正弦信号的作用下,加入随机干扰,系统经过 12 步预测之后,得到如

下的波形图;图 3 为在干扰情况下,未加入灰色预测控制的阶跃响应曲线;图 4 为在干扰情况下,加入了灰色预测控制的阶跃响应曲线;图 5 为在干扰情况下,加入灰色预测控制的正弦响应曲线。

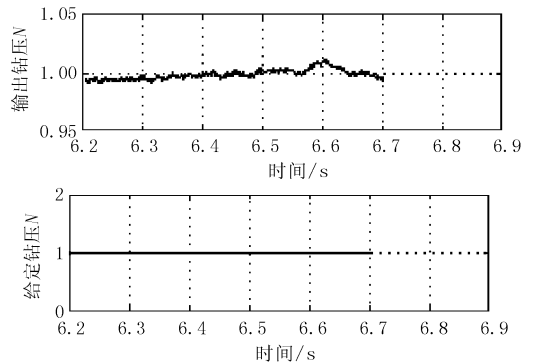


图 3 未加灰色预测控制的阶跃响应曲线(干扰情况下)

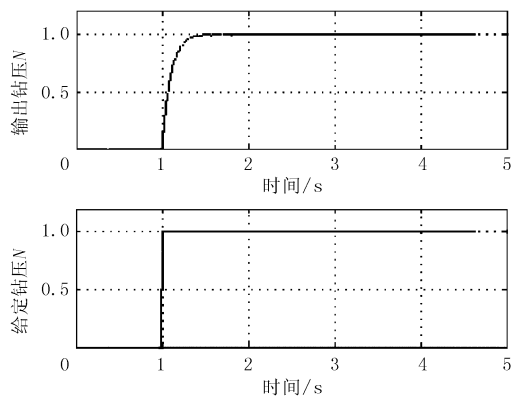


图 4 加入灰色预测控制的阶跃响应曲线(干扰情况下)

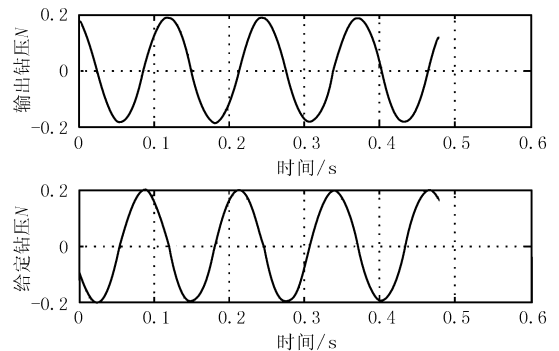


图 5 加入灰色预测控制的正弦响应曲线(干扰情况下)

从图 3 不难看出,自动送钻钻压控制系统在外界干扰的作用下,振荡比较大,系统不稳定,跟踪效果差;当加入灰色预测控制算法时,预测控制系统即使在外界干扰的情况下,系统无超调量,且系统能较快地达到稳定状态,跟踪效果好,如图 4 和 5 所示。这是因为在建模过程中是通过原始数据进行累加生成,这样累加的结果就可以大大弱化非线性干扰的影响。

(下转第 36 页)

设计单位根据地质报告的地基承载力取值,30 层左右的高层楼房其钻(冲)孔扩底灌注桩的桩端持力层一般选择于中风化岩内,且用上了桩侧摩阻力。比在广东省标准《建筑地基基础设计规范》(DBJ 15-31-2003)发布之前保守得多。

我们在深圳、福田、南山施工了 60 个钻(冲)孔扩底灌注桩基础项目,有的项目还进行了静载试验。通过试验及封顶后的各大厦沉降观测结果统计,笔者有如下几点体会和看法。

(1)设计时选择钻(冲)孔扩底灌注桩的持力层应计算侧阻力,但取值不宜偏高,钻(冲)孔桩是泥浆护壁,在几年之内泥皮未完全失水、固结,有一定润滑作用,侧摩阻力较小。但多年以后泥皮固结,摩阻力会大幅度增加。当然钻孔桩摩阻力取值是较复杂的,各场地不同区域分层厚度不一,设计时侧摩阻力取值就难于确定,所以不能完全照搬有关规范的经验数据。

(2)设计深圳的项目不能完全搬用广东省标准《建筑地基基础设计规范》(DBJ 15-31-2003),此规范的有关桩端阻力特征值的经验值具有广州地区的代表性。

(3)钻(冲)孔扩底灌注桩的持力层若选在强风化花岗岩时,应根据该场地强风化岩的厚度计算其桩端土承载力标准值。一般情况下强风化岩较薄的地层其层内存在碎块状中风化岩块,压缩性较低,承载力较高。强风化岩较厚的地层(4 m 以上),强风化层上部风化程度高,压缩性高,承载力低;中部压缩性居中;下部压缩性低,承载力较高。强风化花岗岩承载力标准值参考数据为:上部 2000~2300 kPa,中部 2400~2600 kPa,下部 2700~3300 kPa,对千枚岩、泥岩、砂岩等岩性不同的强风化岩层需要另行考虑。

所以,强风化岩层较厚(>8 m)时可将强风化

岩的中上部作为桩的持力层,以缩短桩长减少工程量;若岩层厚度在 4~8 m 时,宜选择进入岩层中部;若岩层厚度 <4 m,则桩端要进入强风化层的下部。

(4)关于桩端入持力层深度的问题,不少的设计院要求入强风化岩一定深度或入强风化岩几倍的桩直径。笔者认为不甚合理。譬如,一个桩孔强风化花岗岩厚度有 2 m,而另一桩孔强风化岩有 10 m,如果设计要求入强风化岩 1.5 m,则第一根桩端坐在强风化花岗岩下部,桩端土承载力高,而另一根桩只坐在强风化岩的上部,其桩下岩土压缩性高,承载力低。又如,在强风化花岗岩厚度都为 2.5 m 的 2 个桩孔内施工,第一根桩设计桩径 0.8 m,而另一根桩设计桩径 2 m,若设计要求桩端入强风化岩 1 倍的桩径,则第一根桩桩端坐在强风化岩的上部,承载力低,而另一根桩则已坐在了强风化岩下部,承载力高。所以要根据桩径大小、岩层厚度分别确定桩端入持力层深度。

### 3 结语

目前深圳的建设仍在高速发展,开发商的思路越来越新,新盖楼盘越来越高,成本控制越来越注重,对建设者的技术要求越来越严,一个个新的课题摆在我们面前。许多勘察、设计单位在设计建筑物的基础时对选择桩型均看成是一个较慎重的课题,而选择的桩端持力层更是慎之又慎。既要保证建筑物的安全,又要经济合理、省钱省时。所以设计时考虑问题更要周密细心。

对于施工单位则更应加强责任心,施工中要随时分析复杂变化的地层,施工操作中不能完全依赖地质勘察报告,要根据管桩的贯入度、桩孔取出的岩样、钻进效率等判别土层性质,摸索规律。只有这样才能做出让业主放心的工程。

(上接第 23 页)

## 5 结论

本文将灰色预测控制理论应用在自动送钻钻压控制系统中,灰色预测模型随着数据的变化而不断更新,使得系统在外界干扰的情况下,也能保持良好的稳定性,无超调,精度更高;系统的适应性强,且计算量小,具有很强的实时性和可实现性。实验仿真结果表明,灰色预测控制算法适合应用在钻压系统这样一个非线性、大时延、无法建立精确数学模型的控制对象中。

## 参考文献:

- [1] 陈如恒,沈家骏. 钻井机械的设计计算[M]. 北京:石油工业出版社,1995.
- [2] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版,1987.
- [3] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [4] 高岩. 石油钻机自动送钻智能控制系统[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
- [5] 王晓华,林立. 钻机盘式刹车自动送钻的模糊控制研究[J]. 制造业自动化,2000,(22):5.
- [6] 张连山. 国内外自动送钻装置现状与发展[J]. 国外石油机械,1996,7(3):1-8.
- [7] 朱小平. 钻机自动送钻系统模糊最优控制[J]. 石油机械,2004,33(2):22.