

# 风动潜孔锤钻进效率敏感性灰色关联法分析

李晶<sup>1</sup>, 王群伟<sup>2</sup>, 庞少青<sup>1</sup>, 李国东<sup>1</sup>

(1. 华北地质勘查局第四地质大队, 河北 秦皇岛 066013; 2. 中国化学工程第十三建设有限公司, 河北 沧州 061000)

**摘要:**分析了影响风动潜孔锤钻进效率的影响因素,利用实验数据建立了数学模型,然后根据灰色关联分析法对各影响因素进行敏感性分析,得到各个影响因素与钻进速度的关联程度。利用敏感性分析结果可以针对提高风动潜孔锤钻进效率采取科学措施,更有利于规范管理。

**关键字:**灰色关联分析;风动潜孔锤;敏感性分析;钻进效率

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)12-0037-03

**Grey Relation Analysis on the Sensitivity of Influencing Factors of Pneumatic DTH Hammer Drilling Efficiency/LI Jing<sup>1</sup>, WANG Qun-wei<sup>2</sup>, PANG Shao-qing<sup>1</sup>, LI Guo-dong<sup>1</sup>** (1. No. 4 Geological Brigade, North China Geological Exploration Bureau, Qinhuangdao Hebei 066013, China; 2. The 13th Construction Co., Ltd. of China National Chemical Engineering, Cangzhou Hebei 061000, China)

**Abstract:** The factors that influence DTH hammer efficiency are analyzed and the mathematical model is established based on the experimental data. The sensitivity analysis is made on each influencing factor by grey relation analysis method to obtain the correlation degree of each factor and the drilling speed. By using the sensitivity analysis results, the scientific measures can be adopted to improve the drilling efficiency of pneumatic DTH hammer.

**Key words:** grey relation analysis; DTH hammer; sensitivity analysis; drilling efficiency

## 0 引言

风动潜孔锤钻进以其较高的钻进效率、较长的钻头寿命、较低的钻孔成本和无需泥浆护壁等显著特点,在各钻探领域展现出巨大的应用前景。目前,在矿山开采、地质勘探、水文水井、工程施工钻探等领域,潜孔锤已被广泛使用。风动潜孔锤反循环钻进技术在低压、低渗、低产油气藏的高效开发方面和复杂地层、深井硬岩地层的快速钻井等方面有着广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

一般来说,风动潜孔锤钻进是多种因素共同作用的结果,要想知道影响风动潜孔锤钻进效率的主要因素,首先要分清楚钻进效率影响因素之间的关系及其重要性,这样才能抓住影响钻进效率的主要矛盾、主要特征和主要关系。研究风动潜孔锤的各个影响因素的敏感度,从众多影响因素中找出主要的影响因素具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。本文采用灰色关联分析进行各因素敏感性分析,然后从整体出发进行综合评价。

## 1 风动潜孔锤钻进速度影响因素

### 1.1 进尺

随着进尺增加,钻杆柱受井壁限制产生波浪形

变,这导致钻孔深度、钻杆柱质量以及钻孔孔径等对钻进速度有影响。并且随着进尺增加,钻具受到的阻力增加,钻头磨损量增加,这将导致钻进速度降低。对于地下水位以下地层,钻进时还会有水作用力的影响,也可能导致钻进速度降低。

### 1.2 风压

风动潜孔锤钻进效率的高低是受风压直接影响的,风压越大,其冲击功越大,碎岩效率越高。大直径风动潜孔锤钻进时,首先应满足冲击器工作压力的要求,使其满负荷工作。同时,还需要满足随着钻孔深度增加带来的沿程压降,克服水位以下的水柱压力和排除孔内岩屑的压差等要求<sup>[6,7]</sup>。

### 1.3 钻压

风动潜孔锤破碎岩石的原理主要是依靠垂直方向的冲击动载做功将岩石击碎。钻压给岩石内部预应力,改善冲击能量的传递条件。钻压过大过小都会影响钻进无法正常进行。

钻压过大切削刃单位进尺磨损量增加,并且引起钻具大幅振动、硬质合金齿掉落,锤头断裂<sup>[6]</sup>。因此钻压不能过大,但必须克服冲击器反弹力。钻压过小将会影响冲击动载对锤头的有效传递<sup>[8]</sup>。

### 1.4 转速

收稿日期:2014-05-05

作者简介:李晶(1987-),男(汉族),山东潍坊人,华北地质勘查局第四地质大队助理工程师,钻探工程专业,从事钻探生产管理及技术工作,河北省秦皇岛市海港区崔庄南里444号,lijing198712@163.com。

硬质合金潜孔锤回转仅是为改变切削刃破岩的位置,若转速过慢,切削刃将打入先前的坑穴中使钻头回转受阻。若转速过快,会导致切削刃过早磨损。所以,转速是否合理将直接影响钻速和钻头寿命。

### 1.5 钻头工作时间

随着钻头工作时间增加,钻头的磨损增加,切削具与岩石接触面积增加,此时钻压如果不变,钻进速度将会衰减。钻头磨损越快,钻速衰减越大。文献[6]中提出钻速与钻进时间关系公式,如公式(1)所示。由此可见钻进速度与钻进时间成反比。

$$V_m = A / (S_0 + \theta t)^2 \quad (1)$$

式中:  $V_m$ ——机械钻速;  $A$ ——系数;  $S_0$ ——切削具初始面积;  $t$ ——磨损时间;  $\theta$ ——磨损系数。

### 1.6 岩石类型

岩土钻掘的研究对象是岩土,一方面要提高岩土破碎的生产效率,另一方面要保证孔内岩层稳定。因此岩土体物理力学性质,尤其是强度、硬度、弹性、脆性、研磨性和可钻性等对钻进效率有重要影响。

考虑以上因素,在实验中对风动潜孔锤钻进过程进行实时记录。使用的钻机是经过改造的 CD-3 型液压双卡盘钻机、XRVS-466 型空压机(风压 2.4 MPa,风量 25 m<sup>3</sup>/min)、GQ-127/44 贯通式潜孔锤和 SBC89/44 型外平双壁钻杆等。在现场实际实验中,得到数据见表 1。

表 1 实验数据<sup>[1]</sup>

| 序<br>号 | 岩石<br>类型 | 进尺<br>/m | 风压<br>/MPa | 钻压<br>/N | 转速/(r·<br>min <sup>-1</sup> ) | 钻头工作<br>时间/h | 钻速/(m·<br>h <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------|----------|------------|----------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1      | 硅灰岩      | 11.62    | 1.10       | 1830     | 31.52                         | 2.59         | 3.38                        |
| 2      | 硅灰岩      | 16.72    | 1.10       | 2620     | 31.52                         | 3.65         | 4.84                        |
| 3      | 硅灰岩      | 20.20    | 1.40       | 3840     | 30.00                         | 3.97         | 5.86                        |
| 4      | 砂卡岩      | 26.20    | 1.15       | 5020     | 31.52                         | 5.15         | 5.42                        |
| 5      | 砂卡岩      | 31.30    | 1.10       | 5860     | 31.52                         | 6.91         | 4.17                        |
| 6      | 砂卡岩      | 34.55    | 1.10       | 5380     | 33.52                         | 7.27         | 3.63                        |
| 7      | 砂卡岩      | 35.45    | 1.30       | 5520     | 30.00                         | 7.44         | 3.53                        |

## 2 灰色关联分析法建立数学模型

根据以上数据利用灰色关联法建立数学模型,灰色关联分析法可以从离乱的观测数据中确定各个因素间的关联程度。它的基本思想是根据诸多因素接近程度,分析和确定它们对目标因素的贡献程度。

### 2.1 参考数据和比较数据

灰色关联分析是灰色系统理论的一个分支。应用灰色关联分析方法对受多种因素影响的风动潜孔锤钻进效率进行综合评价。首先要选取反映钻进效率的参考序列  $X_0$ ,参考序列是灰色关联分析中最为

重要的因素,也是关键讨论的问题。确定了参考序列之后,获得相关因素比较序列  $X_i$ 。根据参考序列和比较序列计算关联系数,最后求得相应影响因素关联度。参考序列为:

$$X_0(k) = [x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)] \quad (2)$$

比较序列为:

$$x_i(k) = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & x_3(1) & \dots & x_n(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & x_3(2) & \dots & x_n(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(m) & x_2(m) & x_3(m) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $k = 1, 2, \dots, m$ 。

以表 1 中钻速为参考序列:

$$X_0 = (3.38, 4.84, 5.86, 5.42, 4.17, 3.63, 3.53)^T$$

影响因素为比较序列,其中进尺、风压、钻压、转速、钻头工作时间和岩石类型依次:

$$X_1 = (11.62, 16.72, 20.2, 26.2, 31.3, 34.55, 35.45)^T$$

$$X_2 = (1.1, 1.1, 1.4, 1.15, 1.1, 1.1, 1.3)^T$$

$$X_3 = (1830, 2620, 3840, 5020, 5860, 5380, 5520)^T$$

$$X_4 = (31.52, 31.52, 30, 31.52, 31.52, 33.52, 30)^T$$

$$X_5 = (2.59, 3.65, 3.97, 5.15, 6.91, 7.27, 7.44)^T$$

其中岩石类型为定性数据,为了进行统计分析,采用二值变量法<sup>[9]</sup>进行量化处理,则:

$$X_6 = (0, 0, 0, 1, 1, 1, 1)^T$$

### 2.2 数据无量纲化

因为很多数据的单位不同,为保障建立模型的质量和结果的正确,使数据具有可比性。因此在进行关联分析之前,一般要对原始数据进行无量纲化处理。本文采用均值变换处理比较序列,结果如表 2 所示。

表 2 无量纲化后数据

| 序<br>号 | 岩石<br>类型 | 进尺<br>/m | 风压<br>/MPa | 钻压<br>/N | 转速/(r·<br>min <sup>-1</sup> ) | 钻头工作<br>时间/h | 钻速/(m·<br>h <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------|----------|------------|----------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1      | 0        | 0.46     | 0.93       | 0.43     | 1.00                          | 0.49         | 0.77                        |
| 2      | 0        | 0.66     | 0.93       | 0.61     | 1.00                          | 0.69         | 1.10                        |
| 3      | 0        | 0.80     | 1.19       | 0.89     | 0.96                          | 0.75         | 1.33                        |
| 4      | 1        | 1.04     | 0.98       | 1.17     | 1.00                          | 0.98         | 1.23                        |
| 5      | 1        | 1.24     | 0.93       | 1.36     | 1.00                          | 1.31         | 0.95                        |
| 6      | 1        | 1.37     | 0.93       | 1.25     | 1.07                          | 1.38         | 0.83                        |
| 7      | 1        | 1.41     | 1.10       | 1.28     | 0.96                          | 1.41         | 0.80                        |

均值变换公式如公式(4)所示:

$$y(k) = x(k) / \bar{x} (\bar{x} \neq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4)$$

## 3 风动潜孔锤敏感性分析

根据关联系数公式(5)分别计算每个比较序列与参考序列对应元素的关联系数:

$$e_i(k) = \frac{\min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (5)$$

式中: $\rho$ ——分辨系数,在(0,1)内取值,通常取 $\rho = 0.5$ 。

计算完关联系数后,对各评价对象(比较序列)分别计算关联系数的均值,以反映各评价对象与参考序列的关联关系,并称其为关联度。如公式(6)所示。

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m e_i(k) \quad (6)$$

灰色关联模型的建立充分地体现了灰色关联公理,规范性、整体性、偶对称性和接近性,其计算着重考虑了点与点之间的距离远近对关联度的影响。其中, $\rho$ 称为分辨系数,若 $\rho$ 越小,则关联系数间差异越大,区别能力越强;若 $\rho$ 越大,则关联系数间差异越小,区别能力越弱。分辨系数避免了系统因子观测序列的异常值支配整个系统的关联度,能够使关联度更好地体现系统的整体性,本文取0.5。对数据进行计算得关联系数如表3所示。

表3 关联系数

| 序号 | 岩石类型 | 进尺/m | 风压/MPa | 钻压/N | 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 钻头工作时间/h |
|----|------|------|--------|------|---------------------------|----------|
| 1  | 0.48 | 0.70 | 0.83   | 0.68 | 0.76                      | 0.73     |
| 2  | 0.39 | 0.62 | 0.82   | 0.59 | 0.90                      | 0.64     |
| 3  | 0.34 | 0.57 | 0.85   | 0.62 | 0.66                      | 0.55     |
| 4  | 0.77 | 0.80 | 0.74   | 0.94 | 0.77                      | 0.74     |
| 5  | 0.96 | 0.71 | 1.00   | 0.63 | 0.95                      | 0.67     |
| 6  | 0.82 | 0.57 | 0.89   | 0.63 | 0.76                      | 0.57     |
| 7  | 0.79 | 0.54 | 0.71   | 0.60 | 0.83                      | 0.54     |

由表3及公式(6)计算得到每个影响因素的关联度:

$$r(X_0, X_1) = 0.65$$

$$r(X_0, X_2) = 0.65$$

$$r(X_0, X_3) = 0.84$$

$$r(X_0, X_4) = 0.67$$

$$r(X_0, X_5) = 0.81$$

$$r(X_0, X_6) = 0.63$$

根据以上比较发现,与钻速的关联程度较高的为0.84和0.81,分别为风压和转速。其次为0.67、0.65、0.65、0.63,分别为钻压、进尺、岩石类型和钻头工作时间。

#### 4 结语

(1)利用灰色关联分析法对影响风动潜孔锤钻进速度的各因素进行敏感性分析,得到对风动潜孔锤钻进速度影响最大的因素是风压和转速,然后依次为钻压、进尺、岩石类型和钻头工作时间。为提高风动潜孔锤钻进效率,如何采取科学措施提供了借鉴意义。

(2)本文利用灰色关联分析方法对多种因素进行分析,然后从整体观念出发进行综合评价,相比于正交分析可以减少大量工作量。

(3)综上所述,本文分析了风动潜孔锤钻进效率影响因素,并对各影响因素进行灰色关联敏感性研究。本文抛砖引玉,希望能为其它学者提供借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 朴金石,殷琨,范黎明,等.利用神经网络法预测风动潜孔锤钻进速度[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(5):882-886.
- [2] 曹明霞.灰色关联分析模型及其应用的研究[D].江苏南京:南京航空航天大学,2007.
- [3] 王浙明,史惠祥,苏雨生.灰色关联模型用于工程方案优化[J].中国给水排水,2002,18(1):80-83.
- [4] 赵选民.概率论与数理统计典型题分析解集(第2版)[M].陕西西安:西北工业大学出版社,2001.
- [5] 季夜眉.概率与数理统计[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [6] 鄢秦宁.岩土钻掘工程学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [7] 许刘万,史兵言,李国栋,等.大力推广气动潜孔锤及气举反循环组合钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):41-45.
- [8] 赵建勤,李子章,石绍云,等.空气潜孔锤跟管钻进技术与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(7):55-59.
- [9] 胡良平.科研设计与统计分析[M].北京:军事医学科学出版社,2012.

## 内蒙古煤田地质局首口页岩气鄂页1井压裂成功

中国矿业报消息(2014-12-22) 记者日前从内蒙古煤田地质局了解到,该局首口页岩气鄂页1井压裂获得成功,平均日产气量3.8万m<sup>3</sup>。

据了解,鄂页1井是内蒙古页岩气潜力调查评价及开发利用选区研究的首口参数井,目的是为了了解和评估该区块页岩气资源潜力,研究总结页岩气分布与富集规律,为制定

内蒙古页岩气开发利用战略目标和中长期规划提供依据。

据悉,该井设计井深3550m,完钻井深3568m,本次压裂作业选择太1气层为目的层段,有效砂体厚4m,该公司采用加砂压裂,施工压力60MPa,每分钟施工排量3.5m<sup>3</sup>,最终成功实施加砂22.6m<sup>3</sup>,入井液量194m<sup>3</sup>。