

# SPSS软件在钻孔弯曲规律预测中的应用研究

陆洪智<sup>1</sup>, 余瑞琪<sup>\*1</sup>, 石耀军<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 安徽省煤田地质局勘查研究院, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 随着定向钻进技术应用越来越广泛, 钻孔轨迹的控制技术变得尤为重要。为了研究钻孔自然弯曲规律, 找到顶角和方位角的变化趋势, 进而预测待钻钻孔轨迹的变化, 使用SPSS软件对安徽省一号矿区的钻孔测斜数据进行多元方程回归统计分析。在考虑孔深、开孔点空间位置信息( $x, y, z$ 坐标)对顶角和方位角影响的基础上, 建立了四元八次多项式回归方程, 并采用均角全距法, 将回归拟合的钻孔轴线空间位置与实际钻孔空间位置进行对比。结果表明: 将钻孔原始数据进行线性处理后, 用四元八次多项式进行回归, 能得到较好的效果, 若按照钻孔所处地层产状的不同进行分类后进行回归, 拟合程度将进一步提高。利用拟合度高的回归方程, 能用来预测未开孔地区的钻孔自然弯曲轨迹, 对工程施工控制钻孔轨迹也起到了良好的作用, 能更好指导工程的施工。

**关键词:** 定向钻进; 钻孔自然弯曲规律; SPSS; 多元回归; 均角全距法; 钻孔轨迹

**中图分类号:** P634; O212.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)04-0049-08

## Application of SPSS software in prediction of borehole bending law

LU Hongzhi<sup>1</sup>, YU Ruiqi<sup>\*1</sup>, SHI Yaojun<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Exploration Research Institute, Anhui Province Bureau of Coal Geology, Hefei Anhui 230088, China)

**Abstract:** With the application of directional drilling technology more and more widely, the control technology of borehole trajectory becomes particularly important. In order to study the natural bending law of the borehole, find out the change trend of the vertex angle and azimuth angle, and then predict the change of the borehole trajectory to be drilled, use SPSS software to conduct multiple equation regression statistical analysis on the borehole inclinometer data of Anhui No. 1 mining area. On the basis of considering the influence of the hole depth and the spatial location information of the hole opening point ( $x, y, z$  coordinates) on the vertex angle and azimuth angle, a quaternion octave polynomial regression equation is established, and the average angle full distance method is used to compare the spatial location of the regression fitting borehole axis with the actual borehole spatial location. The results show that after linear processing of the original drilling data, a good result can be obtained by using quaternion octave polynomial regression. If the regression is carried out after classification according to the different occurrence of the stratum where the drilling is located, the fitting degree will be further improved. The regression equation with high fitting degree can be used to predict the natural bending trajectory of the borehole in the non-perforated area, which also plays a good role in controlling the borehole trajectory in the project construction, and can better guide the project construction.

**Key words:** directional drilling; natural bending law of borehole; SPSS; multiple regression; the average-angle method; drilling trajectory

随着各种定向钻进技术的应用越来越广泛, 对于定向钻孔而言, 保证钻孔轨迹满足设计要求, 并准确进入目标区域(靶区)是定向钻探工程中的关键, 因此钻孔轨迹的掌握与控制显得更加重要<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2023-01-14; 修回日期: 2023-03-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.04.007

基金项目: 安徽省煤田地质局项目“两淮矿区地面定向多分支水平井高效钻进技术体系研究”(编号: WMDK2020-2)

第一作者: 陆洪智, 男, 汉族, 1974年生, 副教授, 主要从事定向钻进相关研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, 18971576988@189.cn。

通信作者: 余瑞琪, 男, 汉族, 1999年生, 硕士研究生, 主要从事定向钻进研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, yurq@cug.edu.cn。

引用格式: 陆洪智, 余瑞琪, 石耀军. SPSS软件在钻孔弯曲规律预测中的应用研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 49-56.

LU Hongzhi, YU Ruiqi, SHI Yaojun. Application of SPSS software in prediction of borehole bending law[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 49-56.

由于地质地层、钻进工艺等因素的影响,在特定的矿区内钻孔轨迹的自然弯曲有很强的规律性。利用钻孔的自然弯曲规律不仅可以灵活地控制钻孔的角度,方便工程的开展,提高施工的效率,还可以大大减少由于人为造斜、纠斜所带来的工程量,有利于节约,使得投资的成本更少<sup>[4]</sup>,此外还可以提前预计钻孔轨迹的空间位置,对影响孔斜的因素提前采取预防措施<sup>[5]</sup>。因此研究钻孔的自然弯曲规律对定向钻进中控制钻孔轨迹有很大的帮助。

对于钻孔自然弯曲规律分析,常用的方法是统计作图法或相关分析法。其中相关分析法是通过回归方程,以孔深为自变量,以顶角、方位角为因变量,分别得出顶角、方位角与孔深之间的关系,来反映钻孔的自然弯曲趋势。这种方法的好处在于能以较高的准确度反映钻孔空间位置的变化规律,且能随时掌握顶角、方位角两个参数的变化,当变化超过限度时,能及时对钻孔的偏斜进行纠正与预防,避免轨迹偏离严重后难以进行补救措施<sup>[6-7]</sup>。利用钻孔自然弯曲规律的典型曲线可以用来设计定向钻孔的轨迹,在已施工的矿区中,取得详细的钻孔孔斜资料,通过整理分析找到弯曲规律即可使用<sup>[8]</sup>。

SPSS软件可用于统计学分析运算、数据挖掘、预测分析和决策支持任务等方面<sup>[9]</sup>。SPSS现广泛运用到社会科学、自然科学等许多行业领域,在气象、材料、创业、社会问卷调查、统计、医疗医学、食品药品等多个方面均有所应用<sup>[10-22]</sup>。

除了上述领域运用到SPSS,在钻探领域SPSS软件也有所应用。葛子明等<sup>[23]</sup>在研究钻具失效时运用了SPSS软件。由于影响钻具失效的原因有很多种,其中主要因素包括井斜角变化率、岩石可钻性、地温梯度、失效地层、井径扩大程度、工作时间、钻具质量、违规操作和钻压等。为了探究影响钻具失效的原因的主次关系,运用SPSS软件,并结合系统聚类理论,可以得出钻具失效fisher判别模型。将该判别模型在大庆油田的某个区块进行实际运用,发现该模型的正确率非常高,可靠性很强,并找到了影响钻具失效的最主要的影响因素为地层因素。

SPSS软件能很好的对多元方程进行回归分析,可以探究多个变量对顶角、方位角的影响。目前,在钻孔轨迹自然弯曲规律分析中还没有广泛运用SPSS进行回归拟合分析。

## 1 矿区地质情况

一号矿区位于潘集背斜及东部倾伏转折端南翼。潘集背斜为一轴部开阔南缓北陡的不对称背斜。轴迹NWW向,枢纽总体向SEE倾伏,倾伏角 $5^\circ$ ,沿走向稍有起伏。地层走向自东向西为 $N30^\circ E$ 至 $N60^\circ W$ ,倾向SE~SW。背斜北翼倾角较陡,为 $20^\circ \sim 30^\circ$ ,南翼倾角较缓,为 $5^\circ \sim 23^\circ$ ,井田内地层倾角由浅入深逐渐变缓( $23^\circ \sim 5^\circ$ )。一号矿区内主要发育两组张扭性断层,倾角均为 $50^\circ \sim 75^\circ$ 。其次一号矿区内还发育有压扭性断层,该断层属于逆断层,断层的走向与背斜的轴向基本一致或者形成 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的夹角。断层的落差较大,是确定一号矿区边界和采矿区域边界的地质依据。

据钻探揭露及邻区资料,一号矿区内自老至新的地层有奥陶系中下统、石炭系、二叠系、新近系和第四系。含煤的地层主要分布在二叠系山西组、上石盒子组和下石盒子组。

由于泥岩、泥灰岩、灰岩、煤层的岩性差别很大,在钻进过程中,这些地层交替出现,形成地层的软硬互层现象,会使得钻孔发生弯曲。而且矿区断层、破碎地层发育较多。在这些地层处钻进时,会因地层掉块、脱落造成钻具受力不平衡,从而造成钻孔超径,增大了孔壁间隙。这些现象都会导致钻孔轨迹的弯曲。

本文选取了一号矿区内已有的56个钻孔的共849组测斜数据进行回归分析,每组数据包括钻孔钻进的孔深 $L$ ,钻孔初始点经转化后的横、纵、竖轴相对坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ ,顶角和方位角。

## 2 SPSS多元线性回归

### 2.1 多元回归方程的建立

顶角和方位角随孔深 $L$ 的关系选择常用的多项式函数拟合,次数越高,其拟合程度越好,本文矿区钻孔的顶角和方位角随孔深的关系选择六次多项式函数来做回归方程,可写为式(1):

$$f_{\theta(\alpha)} = a_0 + a_1L + a_2L^2 + a_3L^3 + a_4L^4 + a_5L^5 + a_6L^6 \quad (1)$$

式中: $f_{\theta(\alpha)}$ ——因变量顶角(方位角), $(^\circ)$ ;  $a_i$ ——多项式系数; $L$ ——孔深,m。

考虑到钻孔开孔坐标的不同,会决定钻孔所处的地层岩性、地质情况也有所不同,进而影响到顶角和方位角随孔深的变化规律,当钻孔初始点坐标发

生改变,该多项式也会随之改变,即不同钻孔的顶角、方位角随孔深的变化趋势不同,这符合实际规律。因此钻孔初始点坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 影响着该多项式的系数,式(1)中的多项式系数可用初始点坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 表示,以二次展开式为例,即可写做式(2):

$$\begin{cases} a_0 = m_{00} + m_{01}x + m_{02}y + m_{03}z + m_{04}xy + \\ \quad m_{05}xz + m_{06}yz + m_{07}x^2 + m_{08}y^2 + m_{09}z^2 \\ \quad \dots\dots \\ a_6 = m_{60} + m_{61}x + m_{62}y + m_{63}z + m_{64}xy + \\ \quad m_{65}xz + m_{66}yz + m_{67}x^2 + m_{68}y^2 + m_{69}z^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x$ 、 $y$ 、 $z$ ——分别为钻孔初始点的横、纵、竖坐标; $m$ ; $m_{ij}$ ——系数。

将式(2)代入式(1)中,按多项式的次数重新排列,可得到四元八次多项式,该多项式共70项,包括孔深 $L$ ,钻孔初始点坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 共4个变量,将多项式中每一项看作一个新变量,将该四元八次多项式转化为多元线性回归方程式,使用SPSS软件进行回归分析。

## 2.2 多元回归的数据处理

对一号矿区钻孔轨迹数据进行回归,因深度 $L$ ,孔口坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 数据的数量级各不一致,过大数量级的数据如孔口坐标 $x$ 、 $y$ ,在高次方程的拟合中会使得高次项的系数很小,SPSS软件会显示不出准确的系数值,进而使得误差偏大,故需要缩小4个变量数据的数量级使其一致。吴鹏等<sup>[24]</sup>用五元五次多项式拟合塑料制品在注塑过程产生的体积收缩和翘曲变形时,自变量的值大小相差数百倍,于是对自变量的值进行对数变换,使用变换之后的数据进行分析,得到了很好的回归方程。

由于钻孔深度 $L$ 存在0数据,无法对数处理,且对数变换后,各变量的相关性变强,显著变量变少,回归方程的拟合度不高。因此本文采用线性变换,将4个变量数据的数量级调整一致,在不改变原多项式的情况下,将过小的系数也回归出来。

## 2.3 多元回归的变量筛选方式

在统计学分析中,解释变量之间基本独立,为了找到对被解释变量影响最显著的解释变量,使用多元线性回归分析时一般都采用逐步筛选策略。而将多项式每一项都当作新变量时,多项式的项之间存在一定的计算关系,故新变量之间存在一定共线性,严格按照统计学的概念,使用前进筛选和逐步筛选

策略时,多项式很多项会无法进入回归方程,拟合程度不及后退筛选策略。故在使用SPSS软件时筛选方式采用后退筛选策略,尽可能将多项式的项更多的进入回归方程,将显著性不大的项排除出去。

## 3 钻孔轨迹回归结果分析

### 3.1 多元回归的结果

在使用SPSS软件对矿区所有钻孔数据的顶角、方位角进行多元回归分析时,先对深度 $L$ 、孔口坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 的数据进行线性变换,统一缩小数量级,再使用四元八次多项式进行多元回归分析,变量筛选策略选择后退筛选。发现顶角的调整后 $R^2=0.683$ ,方位角的调整后 $R^2=0.242$ ,方位角的调整后 $R^2$ 过小,拟合程度很小,会造成预测值与实际值误差较大。考虑到顶角方位角的变化还与地层倾角有关,把一号矿区的56个钻孔按其所处的地层倾角的不同进行分类,将地层倾角分为 $10^\circ$ 以下、 $10^\circ\sim 15^\circ$ 、 $15^\circ\sim 25^\circ$ 、 $25^\circ$ 以上4大类,在每一类别中分别随机抽取一个钻孔的测斜数据作为该类别对比的原始数据,分别对4类地层倾角的剩余钻孔的所有测斜数据进行上述多元回归分析,将抽取的钻孔原始数据中的孔深 $L$ 、起始点坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 数据代入拟合的多元回归方程后计算出来的顶角、方位角作为预测值。分类后多元回归的结果见表1。由表1可以看出,将钻孔分类后进行多元回归拟合,顶角和方位角的拟合程度较分类前均有显著提高,调整后 $R^2$ 均大于0.5,可近似认为拟合较好,顶角的拟合程度整体均高于方位角的拟合程度。

表1 不同倾角条件下拟合程度的比较  
Table 1 Comparison of fitting degree under different dip angles

地层倾角/ $^\circ$	调整后 $R^2$ (顶角)	调整后 $R^2$ (方位角)
0~10	0.848	0.511
10~15	0.833	0.787
15~25	0.785	0.573
25~75	0.705	0.644

### 3.2 回归方程的分析

以地层倾角 $<10^\circ$ 时的钻孔数据,因变量为顶角的回归过程为例,自变量采用后退筛选策略,通过SPSS软件进行多元回归分析后能得到以下输出

结果。

首先给出了采用后退回归法变量的引入和剔除情况,并且显示引入与剔除的判别标准。引入的标准是将变量全输入方程,直到容差为0,剔除的标准是使用 $F$ 的概率 $P>0.1$ 。一共建立了15个回归模型,第一个模型引入了四元八次多项式中的30个显著变量后,使得容差为0,不再继续引入变量,然后在这30个变量中逐步剔除显著性不大的项,最终剔除了14个变量,保留下16个与因变量顶角最显著的相关变量,以第15个回归模型作为最终采用的回归模型。

由第15个模型的模型摘要可知模型15的复相关系数 $R$ 为0.924,判定系数 $R^2$ 为0.855,调整后 $R^2$ 为0.848。拟合回归的效果较好。

模型15的回归方程显著性检验结果见表2, $F$ 统计量的值为127.38,伴随概率 $P$ 值为0,小于检验水平0.05,说明模型15有统计学意义,可以认为所建立的回归方程有效。

表2 模型摘要表

Table 2 Model summary table

模型15	平方和	自由度	均方	$F$	显著性
回归	2088.938	16	130.559	127.380	0.000
残差	355.660	347	1.025		
总计	2444.597	363			

根据回归方程的系数表,可知回归方程中16个变量的系数,这16个回归系数 $t$ 统计量相应的伴随概率 $P$ 均值小于0.05,即有统计学意义,其回归方程可写为式(3):

$$\begin{aligned} \theta = & -122.249 - 6.783 \times 10^{-3}y + 14.2437h + \\ & 3.233 \times 10^{-4}yh - 0.4006h^2 + 5.9 \times 10^{-10}Lxy - \\ & 1.14 \times 10^{-7}Lyh - 4.7 \times 10^{-10}Lx^2 + \\ & 3.73 \times 10^{-5}Lh^2 + 3 \times 10^{-9}L^2x - \\ & 1.4 \times 10^{-12}L^2xy + 8 \times 10^{-13}L^2x^2 + \\ & 3 \times 10^{-13}L^2y^2 - 1.362 \times 10^{-20}L^6x - \\ & 6.126 \times 10^{-21}L^6y + 2.211 \times 10^{-24}L^6xy + \\ & 8.228 \times 10^{-20}L^6h^2 \end{aligned} \quad (3)$$

在回归分析中,残差需要服从正态分布。带正态曲线的残差分布直方图见图1,可以观察残差分布的正态性。标准化残差的概率图见图2,散点基本都在直线附近,比较靠近直线,从而可以判断标准化残差服从正态分布,因此可以推断回归方程近似满足正态性的条件。

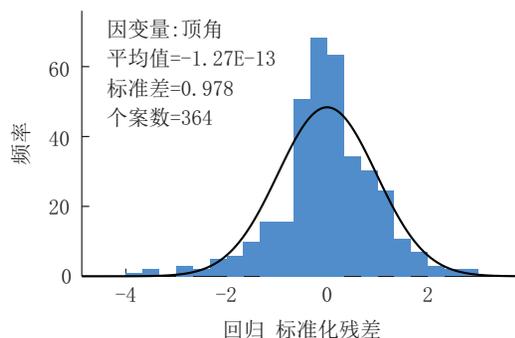


图1 回归方程残差分布直方图

Fig.1 Regression equation residual distribution histogram

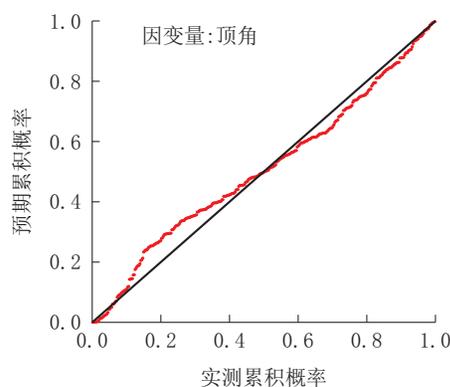


图2 标准化残差的概率图

Fig.2 Probability graph of standardized residual

### 3.3 预测钻孔轨迹曲线图的分析

最常用的几种钻孔轴线空间位置的计算方法分别是全角全距法、均角全距法、全角半距法、曲率半径法和最小曲率法等。其中全角全距法虽然计算公式简便,但误差较大,基本很少使用。李静等<sup>[2]</sup>认为将测点之间假设为曲线段更符合钻孔轨迹实际情况,基于直线段假设前提的均角全距法和全角半距法不能反映孔段顶角和方位角的渐变性。康佳男<sup>[25]</sup>对比全角半距法和最小曲率法两种模拟方法的误差,得出了最小曲率法的计算误差小于全角半距法,但是两种方法的相对误差的千分率相差很小。朱永宜<sup>[26]</sup>利用安徽省矿区钻孔的实测数据,对全角半距法、均角全距法、最小曲率法等计算模型进行误差对比,发现各模型间的相对误差均在 $10^{-4}$ 数量级内。

以一号矿区钻孔wIV-21拟合回归后预测的顶角方位角数据为例,分别用均角全距法、全角半距法、曲率半径法和最小曲率法4种方法进行计算,得到4条拟合预测的钻孔轨迹,表3仅列举出均角全距法和曲率半径法两种方法所计算的预测钻孔轨迹坐

标,其中法 1 表示均角全距法,法 2 表示曲率半径法。4 条预测的钻孔轨迹如图 3 所示,用 4 种不同的计算方法得到拟合的预测轨迹基本重合,最大误差

≠20 cm,相对误差很小,基本可认为 4 种方法的选取影响不大。由于测点之间距离不大,因此本文选择计算简便的均角全距法来计算钻孔轴线空间位置。

表 3 均角全距法和最小曲率法计算预测钻孔轨迹数据

Table 3 Data table for calculating and predicting borehole trajectory by means of average angle full distance method and minimum curvature method

孔深 L/ m	拟合顶角/ (°)	拟合方位角/ (°)	法 1 拟合 x/ m	法 1 拟合 y/ m	法 1 拟合 z/ m	法 2 拟合 x/ m	法 2 拟合 y/ m	法 2 拟合 z/ m
0	0.01	196.63	667.13	5469.42	21.25	667.13	5469.42	21.25
50	0.31	194.45	667.00	5469.38	-28.75	667.00	5469.38	-28.75
100	0.62	192.42	666.60	5469.29	-78.75	666.60	5469.29	-78.76
150	0.93	190.16	665.94	5469.16	-128.74	665.94	5469.16	-128.75
200	1.30	187.42	664.98	5469.01	-178.73	664.98	5469.01	-178.75
250	1.69	184.12	663.68	5468.88	-228.72	663.68	5468.88	-228.74
300	2.12	180.25	662.02	5468.81	-278.69	662.02	5468.81	-278.71
350	2.56	175.89	659.98	5468.88	-328.65	659.98	5468.88	-328.67
400	3.05	170.79	657.55	5469.16	-378.59	657.55	5469.16	-378.62
450	3.55	166.78	654.73	5469.72	-428.51	654.73	5469.72	-428.54
500	4.10	163.22	651.51	5470.59	-478.39	651.51	5470.59	-478.43
550	4.64	159.43	647.90	5471.81	-528.25	647.90	5471.81	-528.29
600	5.27	155.46	643.90	5473.47	-578.06	643.91	5473.47	-578.10
650	5.96	150.67	639.54	5475.68	-627.82	639.54	5475.68	-627.87
700	6.72	146.65	634.82	5478.55	-677.52	634.83	5478.55	-677.56
750	7.55	141.98	629.78	5482.18	-727.13	629.78	5482.18	-727.18
800	8.48	135.87	624.52	5486.76	-776.64	624.53	5486.76	-776.69
850	9.45	127.42	619.34	5492.58	-826.03	619.35	5492.58	-826.09
900	10.55	114.99	614.85	5500.01	-875.27	614.86	5499.99	-875.33
950	11.79	99.90	611.94	5509.25	-924.32	611.97	5509.20	-924.39
975	12.57	88.55	611.55	5514.51	-948.76	611.58	5514.46	-948.82
978.54	12.72	86.20	611.59	5515.28	-952.21	611.61	5515.23	-952.28

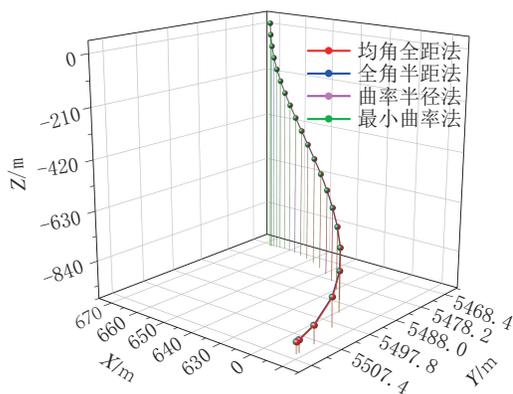


图 3 四种方法计算的预测钻孔轨迹

Fig.3 Predicted borehole trajectory calculated by four methods

在 4 种不同地层倾角条件下,采用均角全距法,利用钻孔实际测斜数据值和代入回归方程计算的预测值,分别计算出实际钻孔轨迹三维坐标和预测钻孔轨迹三维坐标。钻孔轴线轨迹的三维坐标的计算公式为式(4):

$$\begin{cases} x_i = \Delta l_{i-1,i} \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} + x_{i-1} \\ y_i = \Delta l_{i-1,i} \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} + y_{i-1} \\ z_i = \Delta l_{i-1,i} \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} + z_{i-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$ ——分别为上测点的钻孔轴线

坐标, m;  $x_i, y_i, z_i$ ——分别为下测点的钻孔轴线坐标, m;  $\theta_{i-1}, \alpha_{i-1}$ ——分别为上测点的钻孔顶角和方位角, ( $^\circ$ );  $\theta_i, \alpha_i$ ——分别为下测点的钻孔顶角和方位角, ( $^\circ$ );  $\Delta l_{i-1, i}$ ——上下测点之间的轴线长度, m。

根据公式计算的三维坐标分别绘制出钻孔的实际轨迹和预测轨迹的三维图。图4为4种不同地层倾角条件下, 随机选取的钻孔的实际轨迹与预测轨迹三维对比图。

地层倾角为  $10^\circ \sim 15^\circ$  的顶角和方位角的回归方程的调整后  $R^2$  最大, 两个值均大于 0.75, 回归方程的拟合度最高。其次是地层倾角为  $25^\circ \sim 75^\circ$  的回归方程, 调整后  $R^2$  也达到 0.6 以上, 回归拟合度也很高。通过三维坐标图 4(b)、(d) 也能看出, 两者的预测的钻孔轨迹形状与实际钻孔轨迹形状相差不大, 误差不超过 1 m。

地层倾角为  $0^\circ \sim 10^\circ$  和地层倾角为  $15^\circ \sim 25^\circ$  时, 预测的钻孔轨迹形状与实际钻孔轨迹形状就有了明显的不同, 误差较大。两种情况下, 顶角的回归方程的调整后  $R^2$  都很大, 分别为 0.848 和 0.785, 但方位角的回归方程的调整后  $R^2$  较小, 刚刚超过可认为拟合较好的基本值 0.5。因此在后续计算方位角的预测值时与实际方位角的误差较大, 从而导致预测的钻孔轨迹三维坐标与实际钻孔轨迹也有很大的差别, 最大误差甚至超过 16 m。

地层倾角为  $0^\circ \sim 10^\circ$  时, 预测的钻孔轨迹和实际钻孔轨迹虽然误差较大, 但轨迹形状基本预测准确, 如图 4(a); 而地层倾角为  $15^\circ \sim 25^\circ$  时, 预测的钻孔轨迹和实际钻孔轨迹的形状都有较大差别, 如图 4(c)。可以看到倾角为  $0^\circ \sim 10^\circ$  的实际钻孔轨迹的变化较平缓, 顶角、方位角都是均匀变化的, 而倾角为  $15^\circ \sim 25^\circ$  的实际钻孔轨迹变化不规则, 顶角和方位角的改变较大, 可以明显看出在  $-300$  m 左右的实际钻孔轨迹的方位发生陡转。因此利用回归方程预测顶角、方位角时, 在实测顶角、方位角变化不大时, 预测的较准, 而实测顶角、方位角变化不规则时, 预测效果会大大降低。

将 4 种情况下的预测曲线的起始点统一为三维坐标原点, 将 4 个曲线画入一张三维坐标图进行比较, 见图 5。

由图 5 可以看出, 在 4 种情况下, 预测的钻孔轨迹的三维坐标变化均匀, 曲线都很平滑, 不像实际钻

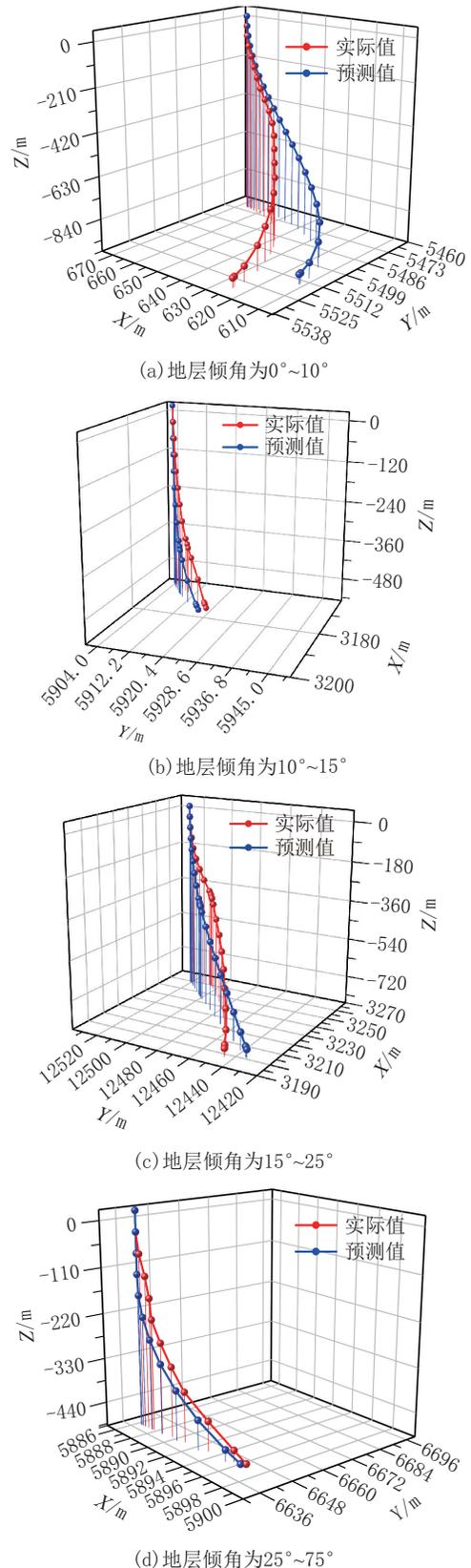


图4 实际轨迹与预测轨迹三维对比

Fig.4 Three dimensional comparison between actual trajectory and predicted trajectory

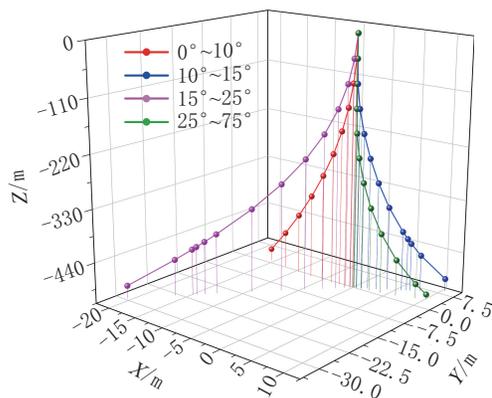


图5 不同倾角条件的预测轨迹对比

Fig.5 Comparison of predicted trajectories under different dip angles

孔曲线那样不规则变化。其中 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $25^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 的预测钻孔轨迹顶角变化没有 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的预测曲线大, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的曲线, $x$ 、 $y$ 坐标的变化较大,顶角变化也大。

造成这种情况可能与地层有关,钻孔基本为竖直孔,当地层倾角小时,地层对钻孔的造斜程度低,钻孔轨迹顶角变化小;而地层倾角增大时,地层对钻孔造斜程度增大,当地层为硬岩层时,此时遇层角较大,钻孔会朝着垂直于层面的方向弯曲,因此,钻孔轨迹顶角变化也增大;而当地层倾角过大时,钻孔的遇层角偏小,小于临界角时可能沿着岩层面下滑,反而使得钻孔轨迹的顶角变化小。

#### 4 结论

(1)在使用SPSS软件对一号矿区钻孔测斜数据进行多元回归分析时,先将自变量孔深、钻孔起始点坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 进行线性变换,使得4个自变量的数量级缩小到同一量级后,回归模型使用四元八次多项式方程进行多元函数拟合,变量的筛选策略选择向后筛选,这样得出方程的拟合结果更好。

(2)对钻孔所处地层的倾角不同,进行数据的分类,用分类后的数据进行多元回归拟合,拟合程度明显增大。

(3)顶角、方位角的回归方程拟合度高,所计算出的预测的钻孔轨迹与实际轨迹的三维坐标误差也小。利用拟合度高的回归方程,能用来预测未开孔地区的钻孔自然弯曲轨迹,更好指导工程的施工。

(4)地层倾角为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时,造斜程度明显大于

其他地层倾角,因此在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 倾角地层中钻进时,要时刻注意顶角和方位角的变化,及时减斜或纠斜。

(5)本文所得出的回归方程只适用于安徽省一号矿区,钻孔数据较少,部分方程拟合度不高,可采用上述方法进一步分析不同矿区的钻孔自然弯曲规律。

#### 参考文献(References):

- [1] 黄井武,王志强,谭玉峰.煤矿工程钻孔轨迹参数计算方法及绘图[J].建井技术,2012,33(2):19-22.  
HUANG Jingwu, WANG Zhiqiang, TAN Yufeng. Calculation method and mapping of coal mine engineering drilling path parameters[J]. Mine Construction Technology, 2012,33(2):19-22.
- [2] 李静,张金昌,陈晓琳.地质勘探钻孔轨迹计算新模型[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(1):22-24.  
LI Jing, ZHANG Jinchang, CHEN Xiaolin. A new calculation model for geological exploration borehole trajectory[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(1):22-24
- [3] 陈俊松,尚亚军,杨建军,等.重庆市秀山县ZK2地热井定向井段钻进工艺[J].钻探工程,2022,49(3):37-43.  
CHEN Junsong, SHANG Yajun, YANG Jianjun, et al. Drilling process for the directional section of ZK2 geothermal well in Xiushan county, Chongqing [J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):37-43.
- [4] 康治昌.利用钻孔自然弯曲的几点体会[J].探矿工程,1960(8):15.  
KANG Zhichang. Some experiences on using natural bending of boreholes[J]. Exploration Engineering, 1960(8):15.
- [5] 沈朝旭.地质勘探中钻孔弯曲原因及预防措施[J].现代商贸工业,2013,25(19):180-181.  
SHEN Chaouxu. Causes of borehole bending in geological exploration and preventive measures [J]. Modern Business Trade Industry, 2013,25(19):180-181.
- [6] 齐瑞忱.钻孔轨迹空间位置的预测方法[J].成都地质学院学报,1992(3):113-120.  
QI Ruichen. Method for forecasting the space position of the borehole trajectory [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1992(3):113-120.
- [7] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.受控定向孔钻进用自动导航系统的分析研究[J].钻探工程,2022,49(2):67-76.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU xin, et al. An automatic navigation system used for controlled directional drilling [J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):67-76.
- [8] 王宏.利用钻孔自然弯曲样板设计定向孔[J].地质与勘探,1989(7):60-62.  
WANG Hong. Directional hole designing by using a template constructed according to the natural bending of the hole [J]. Geology and Exploration, 1989(7):60-62.
- [9] 王红梅.SPSS软件在课题研究中的应用——以SYB创业培训在高职院校中的应用研究为例[J].中小企业管理与科技,2016

- (12):124-125.  
WANG Hongmei. Application of SPSS software in subject research—Take the application of SYB entrepreneurship training in vocational colleges as an example[J]. Management & Technology of SME, 2016(12):124-125.
- [10] 薛薇. 基于SPSS的数据分析(第3版)[M].北京:中国人民大学出版社,2014.  
XUE Wei. Data Analysis Based on SPSS (3rd Edition)[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2014.
- [11] 冯岩松.SPSS22.0统计分析应用教程[M].北京:清华大学出版社,2015.  
FENG Yansong. Application Course of PSS22.0 Statistical Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [12] 张文彤, 邱春伟.SPSS统计分析基础教程(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2011:327-342.  
ZHANG Wentong, KUANG Chunwei. Basic Course of SPSS Statistical Analysis (2nd Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011:327-342.
- [13] 武松, 潘发明.SPSS统计分析大全[M].北京:清华大学出版社,2014:217-234.  
WU Song, PAN Faming. Complete Statistical Analysis of SPSS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014:217-234.
- [14] 侯海桂.关于统计分析内容分类以及相关SPSS分析方法使用的探讨[J].经济师,2014(5):72-75.  
HOU Haigui. Discussion on the classification of statistical analysis contents and the use of relevant SPSS analysis methods [J]. China Economist, 2014(5):72-75.
- [15] 李明华, 崔少萍, 罗凤明, 等. 统计软件SPSS在气象中的应用[J].广东气象,2007,29(1):50-52.  
LI Minghua, CUI Shaoping, LUO Fengming, et al. Application of statistical software SPSS in meteorology [J]. Guangdong Meteorology, 2007,29(1):50-52.
- [16] 罗凤明, 邱劲彪, 李明华, 等. 如何使用统计软件SPSS进行回归分析[J].电脑知识与技术,2008,4(2):293-294.  
LUO Fengming, QIU Jinbiao, LI Minghua, et al. How to do regression analysis by statistical software SPSS[J]. Computer Knowledge and Technology, 2008,4(2):293-294.
- [17] 李伟权, 陈映华, 郭琳晶, 等. 如何综合使用SPSS和Surfer绘制风向频率随时间变化图[J].电脑知识与技术,2009,5(4):954-955.  
LI Weiquan, CHEN Yinghua, GUO Linjing, et al. How to draw chart of variation of wind direction frequency synthetically by SPSS and Surfer[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009,5(4):954-955.
- [18] SANTOS V, GOMES S, NOGUEIRA M. Sustainable packaging: Does eating organic really make a difference on product-packaging interaction?[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,304.
- [19] 陈晓丽, 张庆英, 郭魏, 等. PBL与软件教学在医学统计学实验中的效果评价[J].中国继续医学教育,2021,13(13):20-24.  
CHEN Xiaoli, ZHANG Qingying, GUO Pi, et al. Evaluation on the effect of PBL combined with software in experimental teaching of medical statistics[J]. China Continuing Medical Education, 2021,13(13):20-24.
- [20] MIRAHMAD H, NOZARI B, RAISSI V, et al. Frequency and parasite load of Toxoplasma gondii in hemodialysis patients based on RE gene by real-time PCR [J]. Gene Reports, 2021,23.
- [21] JIN Long, ZHANG Jun, FU Huiqun, et al. FOXO3a inhibits the EMT and metastasis of breast cancer by regulating TWIST-1 mediated miR-10b/CADM2 axis[J]. Translational Oncology, 2021,14(7).
- [22] LEMMA A, SALELEW E, DEMILEW D, et al. Alcohol use disorder and associated factors among University of Gondar undergraduate students: A cross-sectional study[J]. Journal of Substance Abuse Treatment, 2021,129.
- [23] 葛子明, 杨国庆, 王浩妮, 等. SPSS软件及其在钻具失效的应用[J].数字化用户,2013,19(6):18.  
GE Ziming, YANG Guoqing, WANG Haoni, et al. SPSS software and its application in drilling tool failure[J]. Digitization User, 2013,19(6):18.
- [24] 吴鹏, 王幼民, 刘司诚, 等. 面向注塑工艺参数优化的多元高次回归分析模型建立方法[J].塑料工业,2020,48(9):71-75.  
WU Peng, WANG Youmin, LIU Sicheng, et al. Multiple higher order regression analysis model establishment method for injection molding process parameter optimization[J]. China Plastics Industry, 2020,48(9):71-75.
- [25] 康佳男.原始钻孔轨迹模型的建立及模拟方法的精度对比[J].能源与环保,2020,42(4):87-91,96.  
KANG Jianan. Establishment of original borehole trajectory model and accuracy comparison of simulation methods[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020,42(4):87-91,96.
- [26] 朱永宜.钻孔轨迹数学模型在地质勘探中的定位精度验证[J].探矿工程,2001(1):37-39.  
ZHU Yongyi. Verification of the orientation accuracy of mathematical models for borehole courses in geological exploration [J]. Exploration Engineering, 2001(1):37-39.

(编辑 荐华)