

利用地质统计学预测煤层厚度

杜文凤, 彭苏萍

(中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 煤层厚度是煤矿设计与开采必不可少的数据, 准确地预测煤层厚度, 不仅能给煤矿提供有力的地质保障, 而且还能给煤矿带来巨大的经济效益。煤层厚度预测可根据已知钻孔煤层厚度数据通过拟合或回归分析方法来计算, 但由于钻孔数据量有限, 因此, 所预测出的煤层厚度在孔间与外推区域存在较大误差。三维地震资料在横向上具有良好的连续性, 若能将稀疏的钻井数据和密集的地震数据有机的结合起来, 将有助于提高井间和外推区域煤层厚度的预测精度。协克里金是地质统计学中的一种二元、无偏、最优插值方法, 是以区域化变量理论为基础, 以变差函数为基本工具。钻井煤层厚度和地震振幅属性在空间上既存在一定的分布规律, 又存在局部的随机性, 因此可将钻井煤层厚度和地震振幅作为区域化变量, 用变差函数进行模拟, 预测出的煤层厚度, 既可反映钻井数据煤层厚度的变化规律, 又可体现出地震数据的变化趋势。利用研究区巷道揭露的见煤点实测煤层厚度数据, 对协克里金法预测煤层厚度进行检验, 结果发现煤层厚度预测误差大大降低, 精度得到明显提高。这种煤层厚度预测方法特别适合在开展过三维地震勘探的煤矿使用。

关键词: 采矿工程; 煤层厚度; 地质统计; 协克里金法; 厚度预测; 地震资料

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增1 - 2762 - 06

COALSEAM THICKNESS PREDICTION WITH GEOSTATISTICS

DU Wenfeng, PENG Suping

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Coalseam thickness is necessary data for coalmine design and mining. The correct predication result of coalseam thickness not only can provide good geology guarantee for coalmine, but also can bring great economic benefits. Coalseam predicting can be calculated using fitting or regression analysis method according to the known borehole coalseam thickness, but because of the limitation of borehole data amount, there are large errors existenting in predicting thickness between the wells or wells outside area. Seismic data have a good continuity in the transverse, if sparse borehole data could be combined with dense seismic data, it is helpful to increasing the thickness predicting precision between the wells or wells extrapolating zone. Cokriging method is a dualistic, unbiased and optimal interpolation method in geostatistics, and based on regional variables theory and variogram basic tool. Borehole coalseam thickness and seismic amplitude in the space distribution have some regulation and local randomness, so they can be described as regional variables, and can be simulated by variogram, the thickness estimation can reflect thickness variety regulation of well data, also can direct variety trend of seismic data. According to actual measurement thickness data on the roadway coalseam exposing points in the research area, some Cokriging predicting thickness examination have been done, and the predicting thickness error has become lower. The predicting precision has largely increased. The thickness predicting method is especially suitable for some coal mines which have done 3D seismic exploration.

Key words: mining engineering; coalseam thickness; geological statistic; Cokriging method; thickness predication; seismic data

收稿日期: 2009 - 01 - 14; **修回日期:** 2009 - 04 - 10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB219603); 国家自然科学基金面上项目(40874071); 国家重大专项课题(2008ZX05035 - 005 - 001)

作者简介: 杜文凤(1963 -), 女, 博士, 1986年毕业于中国矿业大学煤田地球物理勘探专业, 现为副教授, 主要从事煤田三维地震解释和反演方面的教学与研究工作。E-mail: duwf66@126.com

1 引言

随着煤矿开采深度加深, 煤层厚度成为制约矿井建设发展的重要因素, 主要表现在 3 个方面: 首先煤层厚度变化会对采区巷道布置造成影响。通常煤矿采区巷道是根据已知地质资料布置的, 当煤层厚度发生较大变化时, 会给巷道布置带来一定困难。原为分层开采的厚煤层, 一旦煤层变薄, 只好改为单一煤层开采; 而原为单一煤层开采的, 由于煤层变厚, 被迫要改为分层开采, 因此, 巷道布置要根据煤层厚度的变化作重新调整。其次, 煤层厚度变化会影响计划生产量。在已掘好的工作面回采巷道中, 煤层变薄会直接减少可采煤量, 影响煤矿计划的生产量。第三, 煤层厚度变化会造成工作面回采率下降。在正常开采遇到煤层厚度变薄时, 会造成局部不可采的面积损失, 而局部煤层变厚时, 则会造成丢顶煤或丢底煤的厚度损失, 使工作面的回采率下降。若能在煤矿开采前掌握煤层厚度的变化规律, 并根据其变化规律采取相应的对策, 则会降低因煤层厚度变化对矿井生产造成的不利影响。由此可见, 煤层厚度对煤矿生产建设非常重要。

煤层厚度预测通常是通过已知钻孔煤层厚度数据进行拟合或回归分析, 利用得到的经验公式或回归公式来计算。由于钻孔数据量有限, 因此, 所预测出的煤层厚度在孔间与外推区域存在较大的误差。近年来, 随着三维地震勘探在煤矿采区的广泛应用, 利用横向分辨率较高的地震资料进行煤厚预测, 得到了广泛的应用, 相继出现了地震反演煤层厚度的谱矩法^[1]、煤层厚度的非线性反演方法^[2, 3]、地震属性煤厚预测法^[4, 5]、测井约束三维地震反演煤厚法^[6, 7]、频率域煤层厚度预测法^[8, 9]、煤厚探测小波多尺度分析法^[10]等。这些方法的共同特点是: 以钻孔煤层厚度作约束, 利用地震数据作横向控制, 将稀疏的钻井数据和密集的地震数据有机的结合起来, 提高井间和外推区域的煤层厚度预测精度。

事实上, 井间和外推区域煤层厚度预测的准确与否, 与数据空间插值方法密不可分。协克里金法作为地质统计学中的经典插值方法, 是一种无偏、最优的插值方法, 近年来已在石油勘探开发的储层预测领域得到广泛应用^[11~13]。在煤层冲刷带^[14]和煤层厚度^[15]研究方面, 也有人尝试用协克里金法通过

钻孔和巷道数据来进行预测, 并取得了一定效果, 这说明利用协克里金插值方法进行煤层厚度预测是可行的。

2 地质统计学的理论基础

地质统计学是以区域化变量理论为基础, 以变差函数为基本工具, 对空间分布上既有随机性又有结构性的地质变量进行统计分析, 建立符合地质规律的统计模型, 来反映地层参数的变化规律, 然后用这种规律对参数的空间展布进行预测。

2.1 区域化变量

区域化变量是地质统计学的研究对象, 它是具有数值的空间位置的函数, 即由一点移到下一点时, 函数值是变化的, 并具有明显的不同程度的连续性^[16]。许多地质和地球物理变量都是区域化变量, 如地层埋深、层厚、孔隙度、渗透率和含油饱和度等, 在空间既存在一定的空间分布规律(结构性), 又存在局部的变异性(随机性)。区域化变量具有的结构性和随机性特征, 在地质统计学中, 常用变差异函数来表征。

2.2 变差函数

变差函数是计算区域化变量的核心。变差函数是区域化变量增量平方的数学期望, 也就是区域化变量增量的方差。

假设空间点 x 只在一维 x 轴上变化, 将区域化变量 $Z(x)$ 在 $x, x+h$ 两点处的值之差的方差一半定义为 $Z(x)$ 在 x 方向上的变差函数 $\gamma(h)$, 其表达式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (1)$$

式中: Var 为方差。

实际工作中, 用试验变差函数来计算, 其表达式为

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

式中: h 为 x_i 和 x_i+h 两点的距离, 也称其为滞后距; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ 分别为 x_i 和 x_i+h 两点处的观测值; $2n(h)$ 为相距为 h 的数据对的数目; $\gamma^*(h)$ 为试验变差函数, 是用求 $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$ 的算术平均值的方法来计算的。

以变差函数 $\gamma(h)$ 为纵轴, 以滞后距 h 为横轴, 可做出变差曲线图(见图 1)。图 1 是一理想化的变差

曲线图。第一个特征参数 a 称为变程，它是指当变差函数随着距离的增大而增大，然后达到某一极限

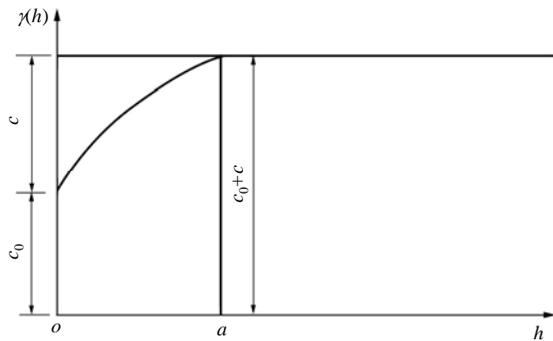


图 1 变差曲线

Fig.1 Variogram function

值趋于稳定时的距离^[17]。变程 a 定量地表明区域化变量空间规律性变化的范围，在这个范围内，两点之间相互影响，影响程度随两点间距离的增大而减弱。当 $h > a$ 时，两点之间不再有空间相关。第二个特征参数 c_0 称为块金常数，它是指当 $h = 0$ 时， $\gamma(0)$ 的值，反映了区域化变量的随机性大小。第三个特征参数 $c + c_0$ 称为基台值，它反映区域化变量空间变化的幅度。其中 c 称为拱高，它是变差函数曲线的切线与 $\gamma(h)$ 轴交点值，其切线的斜率越大，变量越不稳定。

变程越小，区域化变量空间规律性变化的范围越小，该参数在该方向上变化越快，即非均质性越强，相反，变程越大，区域化变量空间规律性变化的范围越大，表明该参数在该方向上变化越慢，也就是非均质性越弱；基台值越大，该参数在该方向上变化幅度越大，也就是非均质性越强；基台值越小，该参数在该方向上变化幅度越小，既非均质性越弱^[18]。

2.3 理论模型拟合

根据实测数据做出的试验变差函数，因数据较少，实际上只是一种锯齿状的非光滑曲线。因此变差函数曲线做出后，还必须用一条适当的圆滑曲线对它进行拟合，并用一个特定的函数来描述，这就是变差函数理论模型，用来反映区域化变量的空间变化特征。理论模型拟合的结果将直接参与克里金计算或其他地质统计学研究。常用的理论模型有球状模型、高斯模型及指数模型。

球状模型作为最常用的模型，其表达式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h = 0) \\ c_0 + c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & (0 < h < a) \\ c_0 + c & (h \geq a) \end{cases} \quad (3)$$

2.4 协克里金方法

协克里金方法是在二阶平稳假设和本征假设的基础上，应用变差函数研究空间上随机且相关的变量分布的方法。协克里金估计值是根据待估计点周围的若干已知信息，通过变差函数，确定估计点周围已知点的参数对待估计点的加权值的大小，然后对待估计点做出最优(即估计方差最小)、无偏(即估计方差的数学期望为 0)的估计。

协克里金是克里金技术的有力扩展^[19, 20]，它取代了仅在稀疏控制点空间相关，通过首要属性与另一采样更密的二级属性间的相关系数，使期望均方差最小来调整估计结果。首先分别建立首要属性及相关属性的变差图，然后构建它们之间的互变差图，从而定义它们之间的相关程度。

协克里金是二元的，协克里金估计值可表示成井点数据和地震数据的线性组合形式，则

$$Z^*(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda x_i Z(u x_i) + \sum_{k=1}^m \lambda y_k Y(u y_k) \quad (4)$$

式中： $Z^*(u_0)$ 为 u_0 位置的估计值， $Z(u x_i)$ 为在位置 $u x_i$ 上的井点数据采样值， λx_i 为其相应的加权系数， $Y(u y_k)$ 为在位置 $u y_k$ 上的地震数据采样值， λy_k 为其相应的加权系数。

利用协克里金估计的无偏和方差最小条件，可导出协克里金方程组，进而求出加权系数，得到协克里金的估计值。

3 应用实例

3.1 研究区概况

研究区位于安徽淮南矿区，三维地震勘探面积为 1.68 km²，主采煤层埋深约 680~830 m。工区的已知钻孔分布较为均匀，煤层厚度在 2~4 m 之间变化。根据已知钻孔，利用井点内插法可得到主采煤层厚度分布(见图 2)，图 2 中外圈数据代表大地坐标，内圈数据代表地震测线编号。

3.2 变差函数的模拟

振幅是地震波动力学的主要特征参数之一，是进行构造形态研究和反射波对比追踪的重要依据。当地层较薄时，由于地层顶、底界面的反射波时差

较小, 不能反映薄层厚度的变化, 通常利用薄层反射波振幅的变化能反映薄层厚度变化的信息。

图 3 是根据研究区三维地震数据提取的主采煤层振幅分布。从图 2, 3 来看, 煤层厚度和地震振幅属性在空间既存在一定的空间分布规律, 又存在局

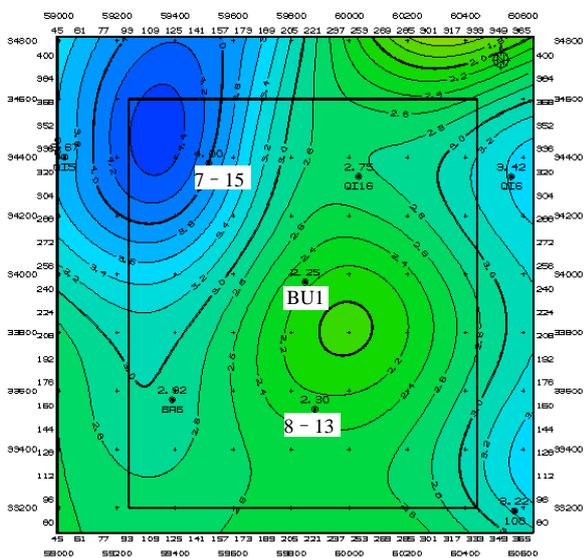


图 2 钻井煤层厚度预测(单位: m)

Fig.2 Borehole Coal seam thickness prediction(unit: m)

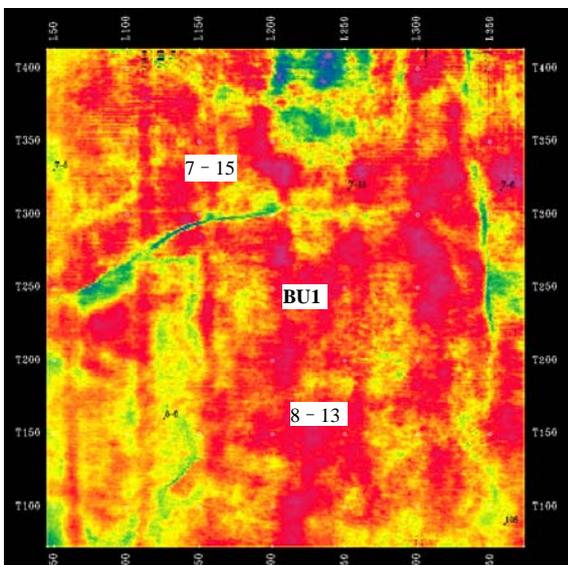


图 3 煤层地震振幅

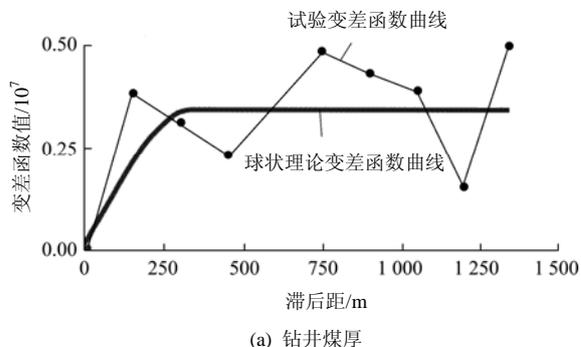
Fig.3 Seismic amplitude of coal seam

部的随机性, 因此可将钻井煤层厚度和地震振幅属性作为区域化变量, 用变差函数进行模拟。

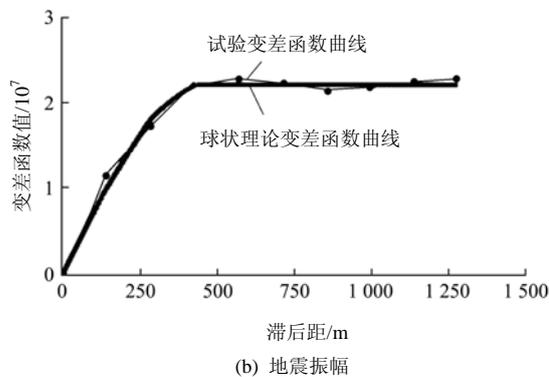
首先根据已知井点处的煤层厚度, 应用球状模型(式(3)), 对试验变差函数进行拟合, 计算出煤层厚度的变差函数模型(见图 4(a)), 然后利用煤层的地

震振幅数据, 得到地震数据的变差函数模型(见图 4(b)), 在此基础上, 利用钻井煤层厚度和地震振幅之间的关系, 求得煤层厚度和地震振幅属性的变差函数模型(见图 4(c))。球状模型变差函数曲线特征值见表 1。

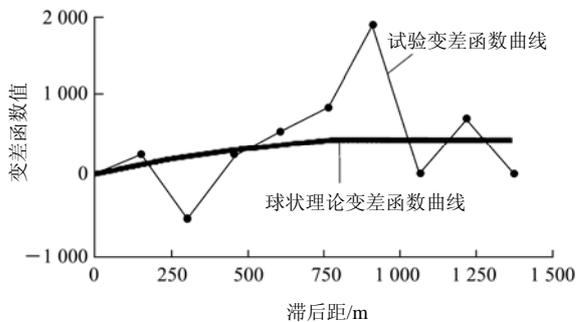
由式(4)可知, 协克里金估计值可表示成井点厚



(a) 钻井煤厚



(b) 地震振幅



(c) 钻井 - 地震数据

图 4 变差函数模型

Fig.4 Variogram function model

表 1 球状模型变差函数曲线特征值

Table 1 Variogram curve feature values of spherical models

数据类型	变差函数曲线特征值		
	变程 a	块金 c_0	基台 $(c + c_0)$
钻井	336.30	0.012	0.34
地震	484.18	0.000	2.2×10^7
钻井地震	860.72	0.000	425.46

度数据和地震振幅数据的二元线性组合形式。根据

协克里金估计的无偏和方差最小条件,可求出协克里金方程组(式(4))加权系数,进而得到协克里金的估计值,即全区每一个数据点的煤层厚度计算值,见图5,图5中内外圈数字代表的含义同图2。

3.3 煤层厚度预测效果分析

从协克里金法煤层厚度预测结果(见图5)来看,7-15孔附近煤层最厚,BU1孔和8-13孔一带,

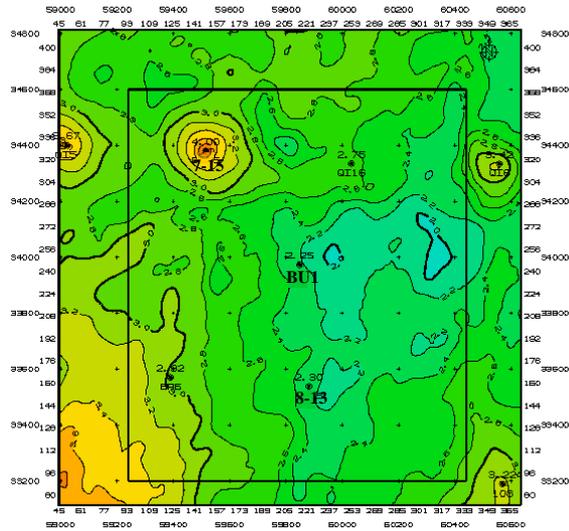


图5 煤层厚度分布(单位: m)

Fig.5 Coal seam thickness distribution(unit: m)

煤层相对较薄。

根据研究区巷道揭露的26个见煤点实测厚度数据,对用井点内插法预测出的煤层厚度和协克里金法预测出的煤层厚度进行了检验(见表2),容易发现,井点内插法预测出的煤层厚度与巷道实测煤层厚度误差较大,最大的厚度差为1.81m,误差(即实测值和预测值的差值绝对值与实测值之比)高达67.04%,而协克里金法预测的厚度总体误差较小,最大误差仅有4.62%,由此可知,利用协克里金法预测出的煤层厚度精度更高。

由此可见,煤层厚度预测方法不同,会使预测精度存在差异。对于煤层厚度预测的井点内插法而言,由于井间没有数据控制,导致煤层厚度预测精度降低,而协克里金法得到的煤层厚度,不但忠实于已知钻井数据,且井间和外推区域由于受到地震

表2 巷道实见厚度与预测厚度对比

Table 2 Thickness correlation between proven points of roadway and prediction

序号	巷道见煤点		厚度 实测值/m	井点内插法厚度			协克里金法厚度		
	X坐标	Y坐标		预测值/m	(实测值-预测值)/m	误差/%	预测值/m	(实测值-预测值)/m	误差/%
1	59 081.0	33 955	3.10	3.17	-0.07	2.26	3.16	-0.06	1.94
2	59 081.0	34 453	3.15	3.86	-0.71	22.54	3.23	-0.08	2.54
3	59 326.6	33 482	3.06	2.93	0.13	4.25	3.16	-0.10	3.27
4	59 326.6	33 532	3.20	2.96	0.24	7.50	3.11	0.09	2.81
5	59 326.6	34 296	2.70	4.32	-1.62	60.00	2.69	0.01	0.37
6	59 326.6	34 442	2.70	4.50	-1.80	66.67	2.78	-0.08	2.96
7	59 326.6	34 487	2.70	4.51	-1.81	67.04	2.69	0.01	0.37
8	59 326.6	34 687	2.70	4.34	-1.64	60.74	2.58	0.12	4.44
9	59 326.6	34 737	2.70	4.26	-1.56	57.78	2.61	0.09	3.33
10	59 552.7	33 233	2.90	2.65	0.25	8.62	2.86	0.04	1.38
11	59 552.7	33 283	2.90	2.67	0.23	7.93	2.94	-0.04	1.38
12	59 552.7	33 333	3.00	2.68	0.32	10.67	2.91	0.09	3.00
13	59 552.7	33 483	2.70	2.69	0.01	0.37	2.72	-0.02	0.74
14	59 552.7	34 643	2.75	4.03	-1.28	46.55	2.84	-0.09	3.27
15	59 552.7	34 693	2.80	4.04	-1.24	44.29	2.82	-0.02	0.71
16	59 812.4	33 315	2.60	2.53	0.07	2.69	2.58	0.02	0.77
17	59 812.4	34 005	2.30	2.37	-0.07	3.04	2.29	0.01	0.43
18	59 812.4	34 130	2.30	2.59	-0.29	12.61	2.28	0.02	0.87
19	59 812.4	34 347	2.60	2.85	-0.25	9.62	2.48	0.12	4.62
20	59 812.4	34 660	3.00	3.02	-0.02	0.67	2.91	0.09	3.00

21	60 056.8	33 254	2.50	2.56	-0.06	2.40	2.51	-0.01	0.40
22	60 056.8	33 442	2.20	2.46	-0.26	11.82	2.27	-0.07	3.18
23	60 056.8	34 237	2.60	2.64	-0.04	1.54	2.57	0.03	1.15
24	60 056.8	34 285	2.60	2.71	-0.11	4.23	2.63	-0.03	1.15
25	60 056.8	34 763	3.00	2.19	0.81	27.00	2.91	0.09	3.00
26	60 056.8	34 789	3.00	2.14	0.86	28.67	2.92	0.08	2.67

数据的约束, 因此预测精度得到提高。

4 结 论

协克里金法作为地质统计学中的一种二元、无偏、最优插值方法, 是以区域化变量理论为基础, 以变差函数为基本工具。钻井煤层厚度和地震振幅属性在空间上存在着一定的分布规律, 又存在着局部的随机性, 因此可把钻井煤层厚度和地震振幅作为区域化变量。

从煤田实际资料出发, 利用协克里金法进行了煤层厚度的预测, 根据研究区巷道揭露的见煤点实测煤层厚度数据, 对协克里金法预测出的煤层厚度进行了检验, 结果发现煤层厚度预测误差大大降低, 精度得到明显提高, 表明协克里金法是一种有效的煤层厚度预测方法。

由于该方法以钻孔煤层厚度作约束, 利用地震数据进行横向控制, 所预测出的结果既包含了钻井反映的煤层厚度变化规律, 又体现了地震振幅的变化趋势, 因此这种煤层厚度预测方法特别适合在开展过三维地震勘探的煤矿使用。

参考文献(References):

- [1] 董守华, 许永忠. 地震资料谱矩法反演煤层厚度[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(1): 38 - 40.(DONG Shouhua, XU Yongzhong, Spectral moment method to inverse coal seam thickness by seismic data[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(1): 38 - 40.(in Chinese))
- [2] 崔若飞, 许东. 煤层厚度的非线性反演方法[J]. 勘察科学技术, 1999, (3): 60 - 62.(CUI Ruofei, XU Dong. Nonlinear inversion method of coal layer thickness[J]. Exploration Science Technology, 1999, (3): 60 - 62.(in Chinese))
- [3] 蔡军, 刘卫. 利用人工神经网络法预测煤层厚度研究[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(6): 40 - 42.(CAI Jun, LIU Wei. Coal seam thickness predicting by the use of artificial neural network simulation[J]. China Coal Geology, 2005, 17(6): 40 - 42.(in Chinese))
- [4] 郭彦省, 孟召平, 杨瑞昭, 等. 地震属性及其在煤层厚度预测中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 557 - 562.(GUO Yansheng, MENG Zhaoping, YANG Ruizhao, et al. Seismic attribute analysis and its application in predicting thickness of coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(5): 557 - 562.(in Chinese))
- [5] 董守华, 马彦良, 周明. 煤层厚度与振幅、频率地震属性的正演模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 29 - 32.(DONG Shouhua, MA Yanliang, ZHOU Ming. Forward modeling of relationship between coal seam thickness and seismic attributes of amplitude and frequency[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(1): 29 - 32.(in Chinese))
- [6] 彭苏萍, 杜文凤, 赵伟, 等. 煤田三维地震综合解释技术在复杂地质条件下的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2 760 - 2 765.(PENG Suping, DU Wenfeng, ZHAO Wei, et al. Coalfield 3D seismic integrated interpretation technique in complex geological condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 760 - 2 765.(in Chinese))
- [7] 林建东, 霍全明, 吴奕峰. 多井约束三维地震反演技术在煤厚预测中的应用[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(3): 43 - 45.(LIN Jiandong, HUO Quanming, WU Yifeng. Application On 3-dimensional seismic inversing technology of multiple constraints in prediction of coal thickness[J]. China Coal Geology, 2003, 15(3): 43 - 45.(in Chinese))
- [8] 崔辉霞, 杨文强, 赵牧华. 钻孔约束频域定量预测煤厚方法研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(2): 6 - 8.(CUI Huixia, YANG Wenqiang, ZHAO Muhua. Research and application of seam thickness prediction method with borehole restrained frequency area quantified[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(2): 6 - 8.(in Chinese))
- [9] 张恩珂, 柏冠军, 郑中刚. 地震资料频率域预测煤层厚度方法研究及应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 59 - 62.(ZHANG Enke, BAI Guanjun, ZHENG Zhonggang. Study of prediction method of coal seam thickness using seismic data frequency domain and its application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2005, 24(4): 59 - 62.(in Chinese))
- [10] 于师建, 王宗胜, 刘延欣. 小波多尺度分析在煤厚预测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 70 - 72.(YU Shijian, WANG Zongsheng, LIU Yanxin. Application of wavelet multiresolution analysis to detecting thickness of coal seam[J]. Coal Geology and Exploration, 2005, 33(5): 70 - 72.(in Chinese))
- [11] 李黎, 王永刚. 地质统计学应用综述[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 163 - 169.(LI Li, WANG Yonggang. Review of application of geostatistics[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 163 - 169.(in Chinese))
- [12] Carmen C D, Larry L. Seismic attributes used for reservoir simulation: application to a heavy oil reservoir in Canada[C]// the 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2008, 27: 1471 - 1475.
- [13] Tonn R. Seismic reservoir characterization of Montney Sand in the Peace River Arch area, Canada[J]. The Leading Edge., 1998, 17(5): 643 - 646.
- [14] 刘俊杰. 地质统计学在预测煤层冲刷带中的应用研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 49 - 52.(LIU Junjie. Application study of geostatistics to predict washout zone in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 49 - 52.(in Chinese))
- [15] 崔洪庆, 张振文, 张平安. 煤厚半变差函数的结构分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2003, 22(3): 310 - 312.(CUI Hongqing, ZHANG Zhenwen, ZHANG Ping'an. Structural analysis of half variation function of coal thickness[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2003, 22(3): 310 - 312.(in Chinese))
- [16] 李岭. 地质统计学及其在某铜矿储量计算中的应用[J]. 矿业

- 研究与开发, 2004, 24(5): 21 - 23.(LI Ling. Geostatistics and the corresponding application of reserves estimation in a copper mine[J]. Mining Research and Development, 2004, 24(5): 21 - 23.(in Chinese))
- [17] 李 琼, 鄢永玲. 地层介质非均质性预测方法技术研究[J]. 矿物岩石, 1999, 19(3): 86 - 89.(LI Qiong, YAN Yongling. Study of prediction technique by stratigraphic medium anisotropy method[J]. Mineral Petrol, 1999, 19(3): 86 - 89.(in Chinese))
- [18] 王泽华, 李 庆. 地质统计学方法在储层预测中的应用[J]. 新疆石油学院学报, 2001, 13(1): 26 - 30.(WANG Zehua, LI Qing. Application of geological statistical method in reservoir prediction[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2001, 13(1): 26 - 30.(in Chinese))
- [19] 季玉新, 曲寿利, 王秀玲, 等. 用地震资料计算复杂砂体储层厚度方法与应用实例[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(3): 361 - 365.(JI Yuxin, QU Shouli, WANG Xiuling, et al. A method for complex sand reservoir thickness estimation using geologic and seismic data, and the application example[J]. Oil Geophysical Exploration, 2000, 35(3): 361 - 365.(in Chinese))
- [20] 刘文岭, 夏海英. 同位协同克里金方法在储层横向预测中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(5): 367 - 370.(LIU Wenling, XIA Haiying. The application of collocated Cokriging in reservoir prediction[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(5): 367 - 370.(in Chinese))