

# 基于 Bezier-样条曲线的工作面煤层赋存状态预测方法

蒋宇静<sup>1</sup>, 刘建康<sup>1</sup>, 王 刚<sup>1,2</sup>, 公 彬<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**为了精确预测采煤工作面内煤层和断层等地质构造的赋存状态,基于工作面开拓勘探数据、顶底板等高线和钻孔勘探预测数据,运用 SolidWorks 软件中 B-样条曲线的插值算法对导线点进行插值。以得到的光滑样条曲线为引导线,以钻孔预测剖面为轮廓,结合顶底板等高线进行放样建模,建立能够精确反映复杂工作面地质构造赋存状态的三维地质模型。结果表明,该三维地质模型可以对每个推采位置进行任意角度的剖切,可观测和分析工作面中的煤层和断层等地质构造的赋存状态,实现精确预测的目的,降低开采风险和采矿成本。此外,SolidWorks 软件的易用性能降低科室及区队一线生产人员的使用门槛,提高采煤工作面生产的技术管理水平。

**关键词:**采煤工作面;B-样条曲线;三维建模;地质构造;放样法

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)05-0035-07

## Prediction Method of Seam Deposit Condition in Coal Face Based on B-spline Curve

JIANG Yujing<sup>1</sup>, LIU Jiankang<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1,2</sup>, GONG Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Based on the data of working face exploration, coal seam's roof and bottom contour and drilling exploration prediction, the traverse points was interpolated by using B-spline curve in the software of SolidWorks in order to accurately predict the geotectonic occurrence of coal seams and faults in coal face. A 3D geological model, which could reflect the complex geological structure of the occurrence of the coal face accurately, was built based on the obtained spline curves as pilot lines and the drill prediction profiles as contours. The results show that this 3D geological model could be cut at different mining locations from arbitrary angle and with it, the occurrence condition of coal seams and faults in coal face could be observed and analysed to achieve the purpose of accurate prediction and reduce the risk and cost of mining. In addition, SolidWorks, the easy-to-use software, can be learned easily by the workers of departments and the coal mine working teams from the first production line and the technology management level of the production of coal face can be improved.

**Key words:** coal face; B-spline curve; 3D modeling; geological structure; laying-off law

三维地质建模已成为地质、采矿、测绘和岩土工程等领域近年来的研究热点<sup>[1]</sup>。所谓三维地质建模,是

收稿日期: 2015-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379117, 51279097, 51479108); 山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150303)

作者简介: 蒋宇静(1962—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。

刘建康(1988—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 从事岩石力学与工程、矿山数字化等方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: sdustjkl@163.com

指利用合适的勘探数据产生具有地质特征的数字模型。与传统二维数据图形相比,三维模型能够更加直观、准确地表达各种地质现象,对煤矿生产设计具有现实指导意义<sup>[2-5]</sup>。国外学者提出各种方法构建三维地质模型<sup>[6-9]</sup>。我国学者在三维地质建模方面的研究主要包括三个方面:理论方法的研究<sup>[10]</sup>;基于国外矿业软件(如著名的 GoCAD 软件等)在三维地质建模领域的应用研究<sup>[11]</sup>;三维地质建模软件的开发(如 3DMine 三维地质建模软件)等工作<sup>[12]</sup>。这些研究与应用大多是针对大型地质体的研究,而面向具体某个采煤工作面精细三维建模方法的研究相对较少,因此真正应用于指导生产现场工作的模型寥寥无几。

为了形象、直观、精确地展示采煤工作面的煤层、断层等复杂地质体的赋存情况,本研究提出了一种新的精确三维建模方法,该方法以生产工作面运输、回风、开切眼巷道开拓勘探实测数据以及钻孔、顶底板勘探数据为基础,结合可靠的地质勘探剖面,运用 SolidWorks 建模软件,采用基于导线点的 B-样条曲线插值方法对工作面地质体进行三维放样建模。一方面使煤层等地质体的三维模型更接近于自然形态,提高地质体建模的精确度;另一方面,运用简单易学的 SolidWorks 软件对工作面地质体的建模,可以实现在工作面地质体任意位置、任意方向的剖切与精确测量,结合实际生产中监测数据对模型进一步修正,实现动态建模,不仅能够满足科研工作者的研究需求,还可以使煤矿工作面一线生产人员能够更加直观、准确的了解工作面煤层、断层等地质构造的赋存情况,指导煤矿工作面实际生产,并对生产设计调整与灾害预防提供依据。

## 1 基本原理及方法

### 1.1 建模平台选择

矿业领域有较多优秀的国外软件,如 Datamine, Micromine 和 Surpac Vision 等三维建模软件。国内也有不少企业开发了像 3Dmine 等一些矿用软件,但由于采煤工作面地质结构比较复杂,加之软件本身还存在很多不足之处,很少能在某个具体采煤工作面得到实际应用,满足一线生产人员对软件实用性、易用性、准确性的要求。SolidWorks 是一种基于特征式的参数实体模型设计工具<sup>[13]</sup>,该软件具有精确绘制二维草图、三维特征拉伸、剖切、扫描、放样等精确建模功能。本研究选择 SolidWorks 三维软件作为建模平台,重点是运用该软件基于导线点 B-样条曲线插值方法对工作面地质体进行三维放样精确建模研究。

### 1.2 插值方法原理分析

#### 1.2.1 插值方法对比

在绘制岩层剖面图时,常用到多边形和曲线绘制方法。在连接岩层预测剖面的岩层分界节点时,可能出现岩层缺失的情况,按照工程勘察惯例,对于缺失的岩层,以 2 个已知点的中点作为推算结果,如图 1 预测剖面 c 中的岩层②。

依据上述原则,用直线连接各岩层分界节点得到岩层分界线的方法即为多边形绘制方法。根据上述方法绘制的岩层边界线为锯齿状折线,如图 1 所示。为了达到精确预测效果,需要对连接线进行曲线平滑处理,样条插值方法是曲线平滑方法的一种,能够严格保证平滑处理后的曲线通过已知点。图 2 给出了岩层分界线经样条法平滑处理后的示意图。

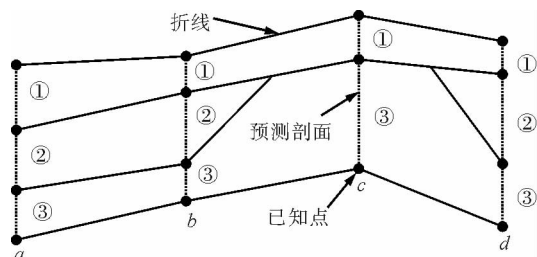


图 1 多边形连接示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the polygon connection

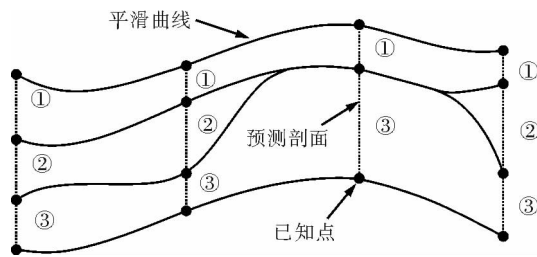


图 2 样条曲线连接示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the spline connection

传统多边形绘制插值法与样条插值法建模对比如图 3 所示。运用传统多边形绘制插值法将离散的岩层分界节点进行插值折线连接,得到岩层边界线为锯齿状折线的三维地质模型,而运用样条插值法将离散的岩层分界点进行插值曲线连接,得到岩层边界线为光滑曲线的三维地质模型。因为实际地质体具有连续性,所以运用样条插值法进行光滑插值得到的地质模型更加精确。

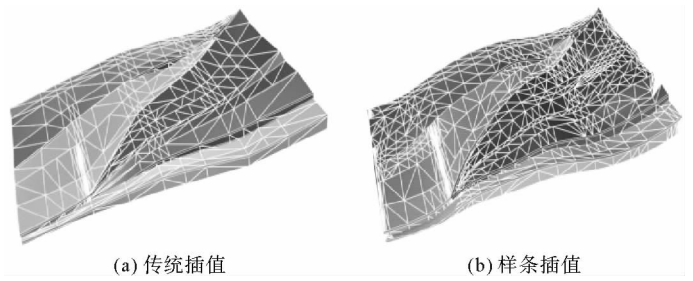


图 3 传统和样条插值法建模对比

Fig. 3 The confrontation of traditional and spline interpolation

### 1.2.2 B-样条曲线插值方法

常用的插值方法有样条法、B 样条法、Bezier 法、分段三次多项式法、张力样条函数法等<sup>[14]</sup>。其中三次 B-样条曲线是最基本、在计算机辅助设计中应用最广泛的样条函数。三次 B-样条曲线插值原理示意图如图 4 所示。

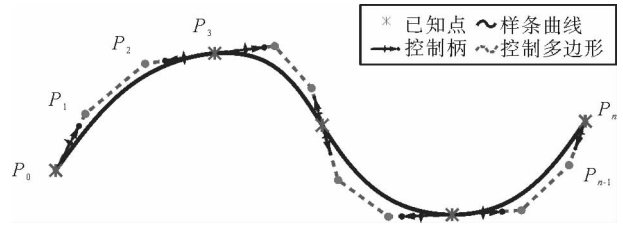


图 4 三次 B-样条曲线插值原理示意图

Fig. 4 The schematic diagram of cubic B spline curve interpolation principle

$k$  次 B-样条曲线的函数表达式<sup>[15]</sup>为

$$p(t) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t), 1 \leq k \leq n. \quad (1)$$

其中: $P_i (i=0, 1, \dots, n)$ 是曲线控制点序列,顺序连接控制顶点所形成的折线图称为控制多边形; $N_{i,k}(t)$ 是调和函数,也称为基函数,可由式(2)递推关系得到。

$$\begin{cases} N_{i,0}(t) = \begin{cases} 0, & t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(t) = \frac{t-t_i}{t_{i+k}-t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1}-t}{t_{i+k+1}-t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t), & k > 0. \\ \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: $i$ 表示序号, $k$ 表示次数, $t_i$ 是节点值,且为非减序列, $T=[t_0, t_1, \dots, t_{n+k+1}]$ 构成了  $k$ 次( $k+1$ 阶)B样条基函数的节点矢量,每一基函数由对应的  $k+2$ 个节点决定。

式(2)也表明,高次 B 样条函数可用低次的 B 样条函数来表示,由此式可得其递推计算方法。

式(1)中,当  $k=3, i=0, 1, 2, 3$  时,所对应的基函数分别为:

$$N_{0,3}(t) = \frac{1}{3!}(1-t)^3,$$

$$N_{1,3}(t) = \frac{1}{3!}(4-6t^2+3t^3),$$

$$N_{2,3}(t) = \frac{1}{3!}(1+3t+3t^2-3t^3)^3,$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{1}{3!}t^3.$$

因此,三次 B 样条曲线方程

$$p(t) = \sum_{i=0}^3 P_i N_{i,3}(t), 0 \leq t \leq 1.$$

即

$$p(t) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 1.$$

### 1.2.3 放样建模原理

三次 B-样条曲线插值方法属于比较常见的曲线光滑插值算法,需要运用函数算法实现曲线的插值,计算较为麻烦,难于直接指导实际煤矿生产,而 SolidWorks 的草图样条曲线功能实现了对 B-样条曲线插值算法的封装,插值出的光滑曲线通过已知的关键导线点。

如图 5,放样原理基本步骤为:①将导线点  $a, b, c, d, e, f, g, h$  进行曲线插值,得到两条光滑的样条曲线 I、II;②设置光滑曲线 I、II 为引导线;③设置钻孔勘探预测剖面 1、2、3、4 为放样轮廓;④结合顶底板等高线 III 进行放样建模,即可得到三维地质模型 M。其中  $a, b, c, d, e, f, g, h$  为工作面运输、回风巷开拓勘探得到的导线点, F 为断层构造。

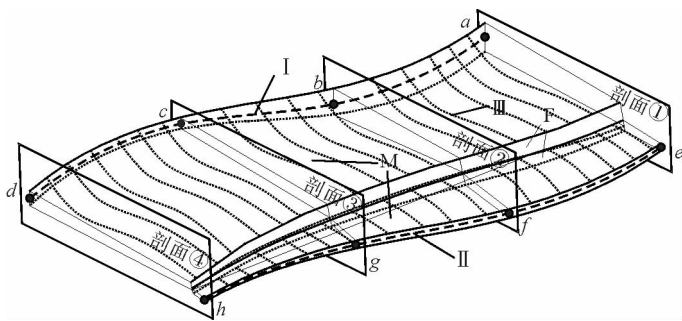


图 5 工作面三维放样建模原理

Fig. 5 The principle of the face three-dimensional modeling

## 2 建模、预测方案设计

由于顶底板等高线、导线点和钻孔勘探预测剖面数据是影响采煤工作面地质模型的重要参数,以此为主要研究点和突破口进行采煤工作面地质体动态建模方法的设计。先根据煤层开采前得到的顶底板等高线、导线点和钻孔勘探预测剖面数据构建工作面回风、运输、开切眼巷道框架模型,再进行煤层、断层等地质体的放样建模。随着煤层不断开采,依据现场实测,对顶底板等高线、导线点和钻孔勘探预测剖面数据不断进行修正更新,进而完成工作面地质体的动态构建。

仅仅完成工作面三维地质模型的建立并不能用于指导实际生产,还需对所建立的三维模型进行预测分析。首先进行工作面地质体剖切预测,在工作面三维模型中建立预测剖切辅助面,依据辅助面对工作面三维模型进行剖切,并对剖切面进行煤层、断层地质数据精确测量及标注,建立的预测剖切辅助面是位于实际生产工作面前方未采区域的预计点处,可实现前后移动进行不定点、任意方向的剖切;然后根据预测剖面对采煤工作面煤层、断层等地质构造发育规律进行分析,指导实际生产。具体方案设计路线如图 6 所示。

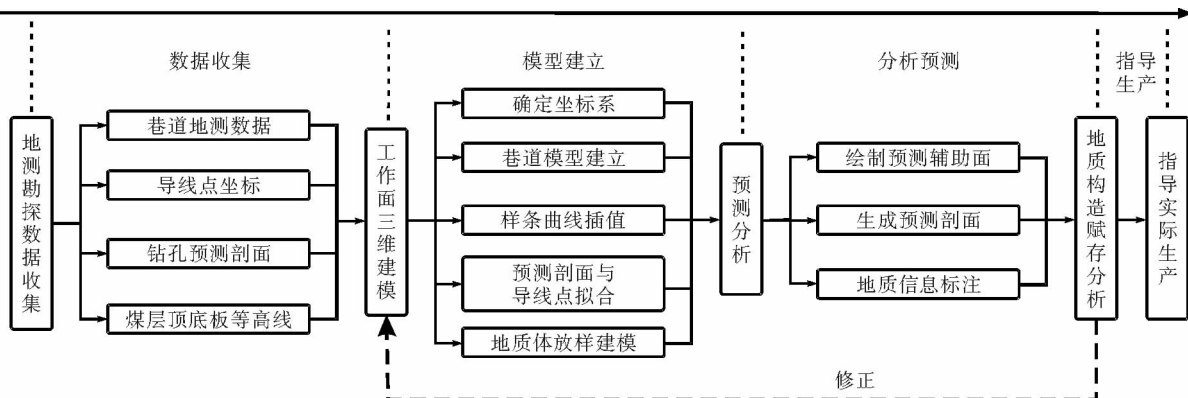


图 6 方案设计路线图

Fig. 6 The map of programme design road

### 3 工程实例应用

#### 3.1 工程背景

所研究的工作面地质建模方法在山东能源集团田陈煤矿 7110 工作面研究运用,田陈煤矿位于滕南矿区中部,于 1989 年 12 月 26 日建成投产。近几年,由于北一、南二采区的高强度开采,可采储量已近枯竭,很快进入采区收缩扫尾阶段,为辅助采区;而北五、北三采区可采储量锐减,全部进入二水平生产。北七采区为田陈煤矿下一步生产接续采区,位于田陈井田最北部,属于矿井水平延伸开拓,目前的钻探和三维物探资料证明,北七采区地质构造条件十分复杂,大、中、小型断层和次级褶皱都比较发育,煤层赋存规律性差,生产环节多,生产接续异常紧张,急需提高采区煤岩赋存状态的勘探、预测精度,为生产设计与计划调整提供依据。

#### 3.2 数据准备

收集 7110 工作面地测勘探数据,包括工作面回风、运输及开切眼巷道开拓时观测的巷帮煤层、夹矸的厚度及倾角以及夹矸的岩性,还包括各导线点的坐标数据(部分导线点坐标数据如表 1 所示)和钻孔预测剖面数据,如图 7 所示。

表 1 部分导线点坐标数据

Tab.1 The data of portion of the wire point coordinate

导线点	真实坐标			模型显示坐标偏距点(3 872 235.12,39 511 012.71,0)		
	坐标 X	坐标 Y	坐标 Z	坐标 X	坐标 Y	坐标 Z
S2	387 223 5.12	395 110 12.71	-730.31	0.00	0.00	-730.31
S3	387 230 2.34	395 110 40.24	-723.30	67.22	27.53	-723.30
S4	387 238 6.65	395 110 75.07	-715.63	151.53	62.36	-715.63
S5	387 240 6.07	395 110 37.09	-711.38	170.95	24.38	-711.38

将收集到的地测勘探数据图在 AutoCAD 软件中进行处理,去掉填充剖面,删除重复的线条,并将图形做成块,为导入 SolidWorks 软件做准备。

#### 3.3 三维模型建立

结合处理好的地测勘探数据图,运用 SolidWorks 软件的拉伸、切除、放样等功能建立工作面三维模型,具体建模步骤如下:

##### 1) 确定坐标系

如图 8 所示。由于矿山的 X、Y 坐标是以全球经纬线为起始点,数据较大,为方便建模引入了偏距的办法,在设计前,指定一点为坐标原点(0,0,0),其他在模型中显示的坐标都是相对于此点的相对坐标。例如偏距点为(39 511 012, 3 872 235,0),真实坐标为(39 511 032, 3 872 285,-732)的点,则该点在模型中显示的坐标是(20,50,-732)。

##### 2) 建立巷道三维模型

以工作面平面图导线点围成的封闭

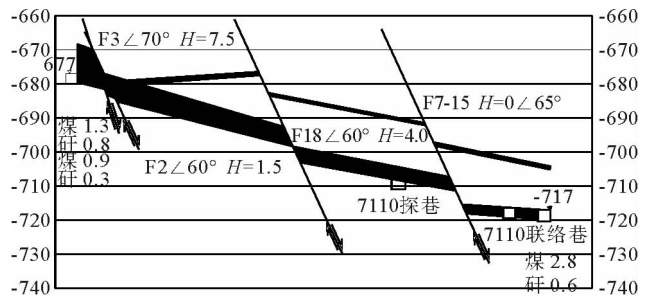


图 7 钻孔预测剖面数据

Fig.7 The geodetic survey data of the face

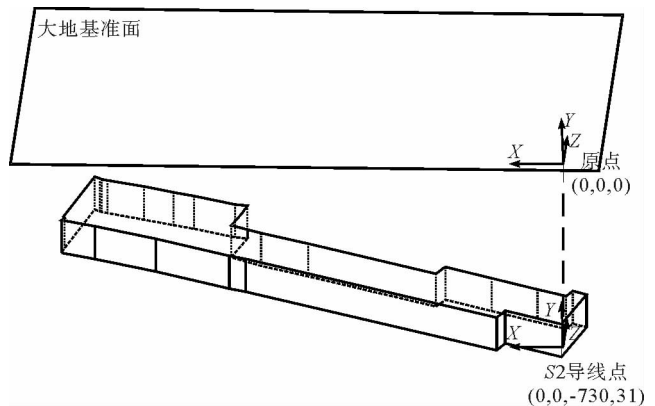


图 8 确定坐标系

Fig.8 The determining of the coordinate system

图形作为草图,利用拉伸命令建立工作面地质体三维模型。然后,以建立的三维模型侧面为基准面分别建立各巷帮的草图。为了保持素描图中各线条的位置关系,将各巷帮素描图处理成块,再将处理成块的各巷巷帮素描图导入到 SolidWorks 草图中,这样在对导线点定位的同时也定位了其余线的位置,进而精确定位了巷道中各元素的位置,最后通过拉伸、切除、放样功能建立工作面各巷道三维模型。

### 3) 样条曲线绘制

将各巷道导线点三维坐标数据储存在.txt 文件中,通过 SolidWorks 软件中 XYZ 样条曲线命令调用此.txt 文件,分别将运输、回风巷中导线点连接绘制成光滑的样条曲线,如图 9 所示。

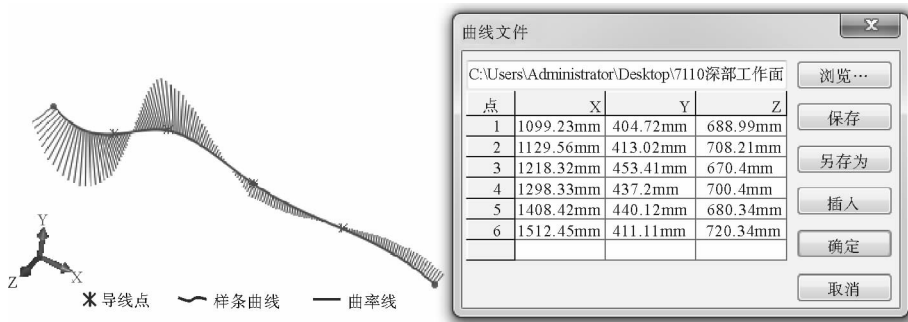


图 9 绘制导线点样条曲线

Fig. 9 The draft of wire point on the basis of spline curve

### 4) 预测剖面与导线点拟合

各地质勘探预测剖面 and 对应导线点拟合,如图 10 所示。

### 5) 地质体建模

运用软件的放样功能,以得到的光滑样条曲线为引导线,以钻孔预测剖面为轮廓并结合顶底板等高线进行放样建模,即可得到三维地质模型,如图 10 所示。

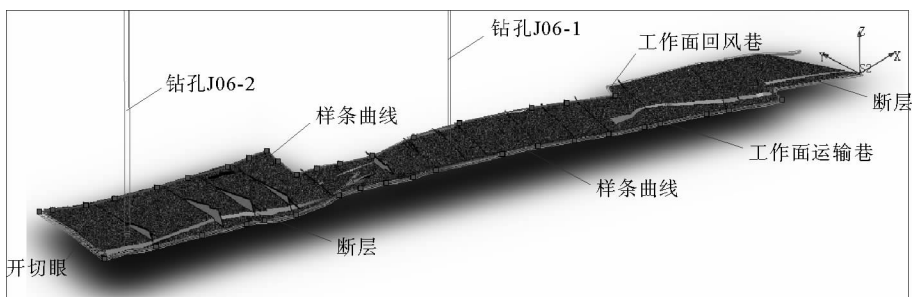


图 10 7110 工作面三维地质模型

Fig. 10 The three-dimensional geological model of the 7110 face

## 3.4 现场应用预测分析

经过初次建模,结合工作面推进时实测数据不断修正、最终得到 7110 工作面三维地质模型,如图 10 所示。如图 11,以具体案例地点进行预测分析,在 7110 工作面已累计推采 500 m 左右,距离钻孔勘探预测剖面⑦ 50 m 左右时,工作面先后揭露 F6、F7、F16、F15 断层,断层纵横交错,此时工作面推进至 7110 联络巷,在此阶段由于部分隐伏断层的突然揭露,导致煤机的工作强度过大,机电事故频繁发生,预示工作面已经进入断层异常区。仅仅依据钻孔预测剖面⑥、⑦无法满足精确预测,工作面难以继续推进。为了使工作面能够顺利推进和安全生产,运用 SolidWorks 软件在已构建的工作面地质三维模型中对应的开采位置前方做剖切

面,图 11 可直观显现出:此工作面大、中、小型断层和次级褶皱都比较发育,煤层赋存规律性差,煤层分叉现象严重。通过运用 SolidWorks 软件测量工具,对煤层走势、煤层夹矸层厚度、断层落差进行精确测量,提前对复杂区域采取措施,有效指导了 7110 工作面的安全生产,避免了安全隐患、采掘设备损坏现象的发生,提高了 7110 工作面安全开采的管理水平。

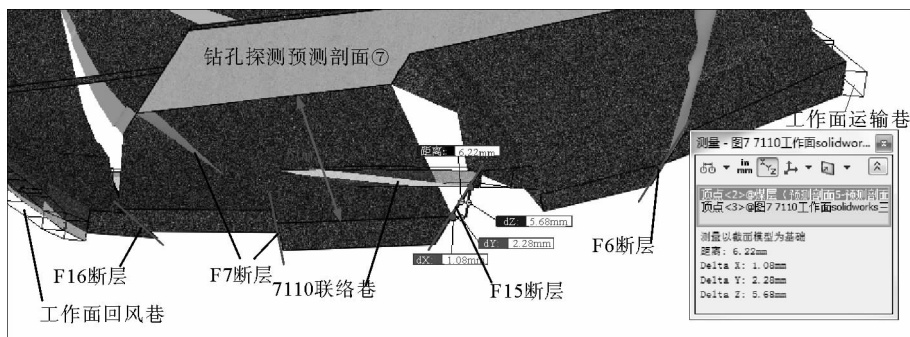


图 11 7110 工作面三维地质模型剖切预测

Fig. 11 The forecast cut of the three-dimensional geological model of the face

## 4 结束语

在分析多种三维建模方法的基础上,提出了一种基于 B-样条曲线的工作面煤层赋存状态预测方法,该方法利用 SolidWorks 软件的 3D 样条曲线草图绘制功能对工作面勘探实测导线点进行光滑插值拟合,同时运用拉伸、放样等功能,建立了能够反映复杂工作面矿体的三维地质模型。7110 工作面现场实践表明,随着工作面的推进,该三维地质模型可以随时对每个推采位置进行任意角度的剖析,可清晰观测和分析煤层中的断层赋存、走向情况,实现工作面内煤层、断层赋存状态的精确预测,提高了 7110 工作面生产的技术管理水平。此外,软件的易用性降低了科室及生产区队一线生产人员的使用门槛,同时可根据工作面的实测和预测数据,针对隐患情况制定合适的生产措施。

## 参考文献:

- [1]宋仁波,王细元,王月香,等.基于 GIS 协同 AutoCAD 和 Google SketchUp 的三维地质建模方法研究[J].工程地质学报,2013,21(5):709-715.  
SONG Renbo, WANG Xiyuan, WANG Yuexiang, et al. GIS coordinating AutoCAD and Google SketchUp based 3D geological modeling method[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 709-715.
- [2]龚国清,刘修国,倪平泽.三维矿床建模技术在阿舍勒铜矿的应用[J].金属矿山,2010(12):120-122.  
GONG Guoqing, LIU Xiuguo, NI Pingze. Application of 3D ore deposit modeling in Ashele copper deposit[J]. Metal Mine, 2010(12): 120-122.
- [3]KAUFMANN O, MARTIN T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(3): 278-290.
- [4]刘占良,朱新磊,杜支文,等.苏里格气田 ZT1 区块储层地质建模[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(1):1-8.  
LIU Zhanliang, ZHU Xinlei, DU Zhiwen, et al. Reservoir geological modeling of ZT1 block in Sulige gas field[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(1): 1-8.
- [5]陈末,卢文喜,侯泽宇,等.基于 ArcGIS 的潮白河地下水三维地质建模及动态模拟[J].节水灌溉,2013(8):39-43.  
CHEN Mo, LU Wenxi, HOU Zeyu, et al. Three-dimensional geological modeling and dynamic simulation based on ArcGIS in groundwater reservoir of Chaobai river[J]. Water Saving Irrigation, 2013(8): 39-43.
- [6]HOULDING S W. 3D Geoscience modeling computer techniques for geological characterization [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1994.