

# 基于 DMIS 的断层三维表面形态自动检测方法研究<sup>①</sup>

席嘉文<sup>1,2</sup>, 张志成<sup>3</sup>, 刘伟方<sup>1,2</sup>, 魏建新<sup>4</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国石油天然气集团公司油藏描述重点实验室, 甘肃 兰州 730020;  
3. 北京南航立科机械有限责任公司, 北京 100076; 4. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

**摘要:**针对断层的测量需求, 利用计算机控制技术对空间曲面自动测量程序进行优化, 以 DMIS (Dimensional Measuring Interface Specification) 为开发平台分别形成四边形键入坐标式自动检测程序和任意多边形自动检测程序, 且通过所述程序完成塔里木盆地塔中 26 井区某断层模型表面形态的仿真, 给出两种针对断层三维表面形态检测的建系方法: 模型建系法和机床建系法。并将空间曲面的自动测量技术应用到断层的三维表面形态测试中, 形成一套针对断层复杂表面形态的自动检测方法, 使得断层的三维表面形态可以通过上述程序自动测量, 且可以使用多个测头角度连续进行一次测量。该方法可以克服在传统的断层检测过程中边界不能完全衔接的问题, 提高断层测量的效率和自动化程度, 降低测量过程中的人为因素和后期的数据处理难度。

**关键词:** DMIS 程序; 计算机控制技术; 地质断层; 空间曲面; 三维表面形态的自动检测技术

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1115-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1115

## Research on Automatic Detection Methods of Three-dimensional Fault Surface Morphology Based on DMIS

XI Jia-wen<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-cheng<sup>3</sup>, LIU Wei-fang<sup>1,2</sup>, WEI Jian-xin<sup>4</sup>

(1. Northwest Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, Gansu, China;  
2. Key Laboratory of Reservoir Description, CNPC, Lanzhou 730020, Gansu, China;  
3. Nanhang Like Machinery Co., Ltd. 100076, Beijing, China; 4. China University of Petroleum, Beijing 102249, Beijing, China)

**Abstract:** Based on fault measurement requirements, we optimize the automatic measurement program of the space curved surface in some domestic and foreign advanced industries, using computer control technology. Moreover, we complete a quadrangle automatic coordinate entering program and an arbitrary polygon automatic detection program based on DMIS (Dimensional Measuring Interface Specification). In addition, we simulate the fault surface in the central Tarim Basin-26 well area using the above programs and inform two system building methods of 3D-surface morphology detection of faults: The Model Building System Method and The Machine Tool Building System Method. Subsequently, the automatic measuring technique of space surface is applied to the 3D-surface shape measurement of faults. In this way, an automatic detection method for the complex surface of the fault is formed. Thus, the 3D-surface shape of the fault can be

① 收稿日期: 2015-03-10

作者简介: 席嘉文(1991—), 男(汉族), 硕士, 工程师, 从事信号处理、电子与计算机技术领域研究。E-mail: gamexi1115@163.com。  
通信作者: 张志成。E-mail: tallzhang@263.com。

measured automatically, and a measurement can be conducted by using multiple angles of view. This allows the boundaries of faults can be fully connected in the traditional fault detection process. This method improves the efficiency and automation degree of fault measurement as well as reduces the human factor and the difficulty of data processing in the measurement process.

**Key words:** DMIS program; computer control technology; geological fault; space curved surface; automatic detection technique of 3D-surface morphology

## 0 引言

三坐标测量技术是以精密机械为基础,结合先进的电子技术、计算机控制技术、光学等的一种三维自动化的高精度测量技术,已广泛应用于机械、汽车、航空航天和电子工业中。尤其是计算机引入后,它不但便于数据处理,而且可以完成 CNC (Computer numerical control)的控制功能,缩短测量时间。

断层表面由自由曲面构成,它的表面形态直接关系到面波勘探调查<sup>[1]</sup>和近断层地震动作用下的土质边坡动力响应<sup>[2]</sup>等问题,所以精度要求高且数据信息量大,传统的三坐标测量方法精度低、耗时长,不能满足要求,因此断层表面形态的检测更趋向于逆向工程<sup>[3]</sup>。对于断层表面形态的自由曲面测量是将三坐标测量技术移植到地震物理模拟中的关键,而进行曲面测量的重点则在于合理高效地定义曲面并实现自动测量。通过长期的探索和研究,空间曲面自动测量已经在部分机械行业中以多种方式体现。目前有部分国内外先进行业通过 DMIS 平台实现任意四边形自动测量,国内学者对于空间曲面的自动测量也做了大量工作:余小勇<sup>[4]</sup>完成了基于 DIMS 和 UG 的 CMM 检验路径生成及仿真;邹刚<sup>[5]</sup>提出了通过截平面法生成理论测量路径,进而确定测量点并计算定位点的方法;宋春刚<sup>[6]</sup>提出了矩形细分和三角面片两种测量路径规划方法。这些研究成果都对用三坐标自动测量技术检测地震物理模型中的断层表面形态有深远影响。

目前对于地震物理模型中断层表面形态的测量以手动接触式测量为主,普通断层常需要进行多次不同角度的测量,且此方法存在工作量大、人为因素高、后期数据处理难度大等问题。本文通过修改和优化 DMIS 程序,将目前机械行业中 CMM(Coordinate Measuring Machine)的自动测量技术应用到断层表面形态测试中,将现有的手动接触式测量更改为自动接触式测量,对于普通断层形态,只需测量一次即可完成多角度自动检测,从而达到提高测量精度、缩短工作时间、为后期数据处理降低了难度的目的。

## 1 通过 DMIS 程序实现断层表面形态的自动检测

### 1.1 修改现有四边形自动检测程序的原因

目前四边形自动检测程序多为机械行业中抽样点检测所用。因为机械零件多为规则形态,一般只需要一个角度即可完成测量,所以边界部分是通过手动打点来确定的。而断层表面的结构较为复杂,且对检测度要求高,意味着必须从多个角度将断层划分为多个四边形,经多次测量才能完整地刻画出断层全貌。随之而来的问题是:(1)手动打入四个边界点的方式无法保证这些四边形的边界完全重合,如果在拼接处有漏采或者重复采集的情况,则很容易造成模型数据失真,并增加后期数据处理的难度;(2)如仅使用四边形来拼接,在断层的边缘部分则不一定能完整反映出断层表面形态特征。若采用三角形、四边形、五边形等任意多边形拼接,则可以以更清晰的点集形式呈现出断层表面形态特征。修改目标:

(1) 将手动打入四个边界点修改为键入四点边界,保证分割的四边形边界可以完全衔接,并在一次测量中更换任意角度;

(2) 将四边形自动检测优化为任意多边形自动检测,保证拼接更完全。

### 1.2 利用 DMIS 开发平台完成程序修改

DMIS 是自动化系统之间检测数据的通信标准<sup>[7]</sup>,可与一些功能强大的语言开发工具完全兼容。内置高级编程命令编辑窗口作为二次开发工具,可与 C、C++、VB、JAVA 等语言共同实现这种通讯标准的数据中性格式的静态或动态的交互<sup>[8]</sup>,完成测量任务。此外,DMIS 语言基于编译原理的设计还利于 C、C++ 的功能嵌入<sup>[9]</sup>,增强自身程序的开发功能。根据断层表面形态的检测要求,在 DMIS 开发界面中对已有程序进行开发优化,不论四边形键入坐标是自动检测程序还是任意多边形自动检测程序,都需要通过 B 样条曲面定义在 DMIS 搭建空间自由曲面函数,该部分工作在原有的四边形程序中已经完成,本文主要通过其定义求出偏导数,保证曲

面方向正确。

空间自由曲面是曲面的一种,其面的形式呈自由变化的状态,起伏多样且无规律,是曲面中最为丰富的一种形式。在检测行业中,如果没有规则的几何参数来精确定义,很难成为一种被检测的几何元素。Huang Yunbao 等<sup>[10]</sup>提出动态曲面重构方法,在曲面数据获取的过程中动态重构 B 样条曲面,因该曲面具有几何和仿射不变性、凸包性、交互性、局部性、分片性等性质,可以使数据点参数化,有效避免无效测量。

定义 B 样条曲面:

$$P(u, v) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_{i,k}(u) N_{j,h}(v) P_{i,j}$$

$$P_{ij} \in R^3; u_k \leq u \leq u_{m+1}; v_h \leq v \leq v_{n+1} \quad (1)$$

式中:  $m \geq k, n \geq h$  称为  $k \times h$  阶非均匀 B 样条曲面; B 样条  $N_{i,k}(u) (i=0, 1, 2, \dots, m)$  与  $N_{j,h}(v) (j=0, 1, 2, \dots, n)$  分别由节点矢量  $u$  和  $v$  按德布尔和考克斯递推公式确定。

根据 B 样条曲面定义,可以初步在 DMIS 中定义任意空间曲面。为保证空间曲面的方向正确,引入其偏导数的计算公式,保证程序在运行时方向检索正确。

对式(1)中定义的 B 样条曲面,若把参数“固定在参数区间  $[u_s \leq u < u_{s+1}]$ ,  $k \leq s \leq m$ , 把参数  $v$  固定在参数区间  $[v_t \leq v < v_{t+1}]$ ,  $h \leq t \leq n$ , 则偏导数可用如下公式计算

$$\frac{\partial}{\partial u} P(u, v) = \sum_{j=t-h+1}^t \sum_{s=k+2}^s N_{i,k-1}(u) N_{j,h}(v) \cdot \frac{k-1}{u_{i+k-1} - u_i} (P_{i,j} - P_{i-1,j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial v} P(u, v) = \sum_{i=s-k+1}^s \sum_{j=h+1}^t N_{i,k}(u) N_{j,h-1}(v) \cdot \frac{h-1}{v_{j+h-1} - v_j} (P_{i,j} - P_{i,j-1}) \quad (3)$$

再对空间曲面定义进行主成份分析,保证所采集测量点均匀分布。

### 1.3 四边形键入坐标式自动检测

针对断层表面形态测试的特点,将英国雷尼绍公司研制的 PH10M 自动旋转测头结合三坐标测量机对四边形自动检测程序进行修改和优化。优化后程序的流程如图 1 所示。

在程序功能部分的最后部分,如果选择:1—手动采点”,保留原程序,手动控制测头打点;如果选择“0—键盘输入坐标点”,程序跳转至键入坐标对话框,键入前一次测量的四点坐标,测量机在程序模式

下开始自动测量,该运行界面如图 2 所示。

操作软件中出现此对话框时,选择键入坐标点检测,输入被测四边形的四个顶点坐标并记录,此时程序参数设置完成。在确认测头升至一个安全高度

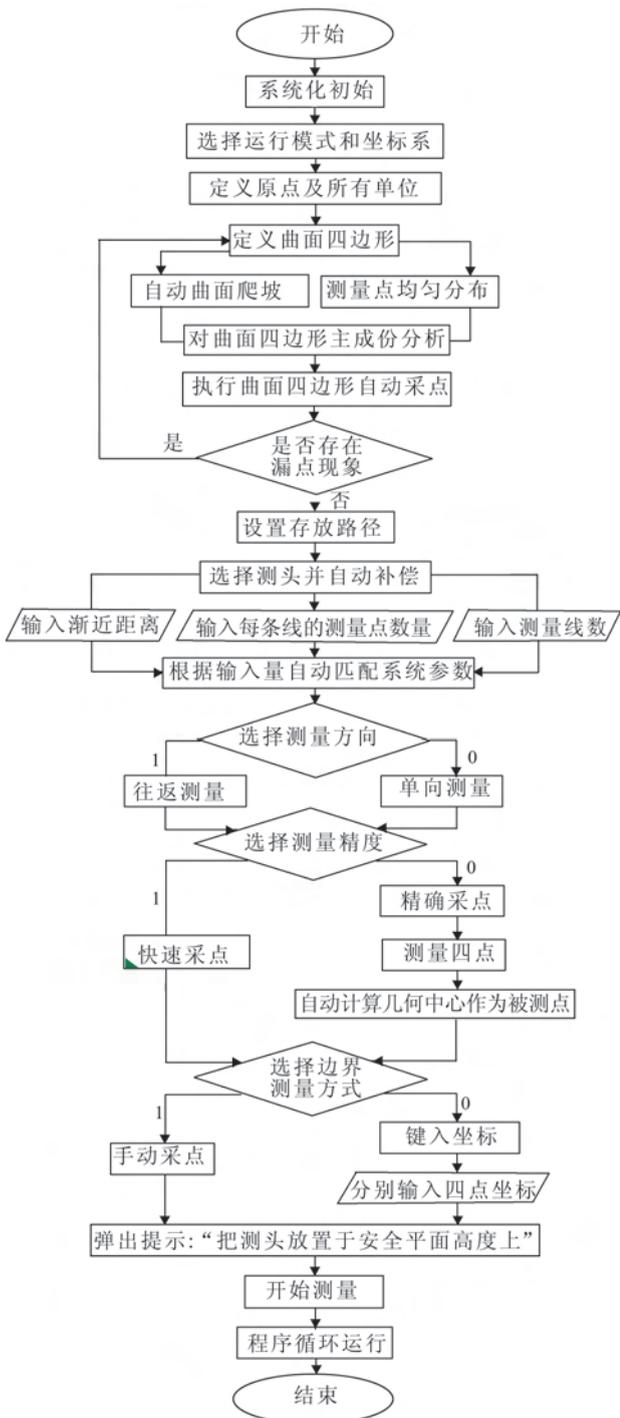


图 1 四边形键入坐标式自动测量程序流程图

Fig.1 Flowchart of quadrilateral coordinate automatic measurement

后,程序循环运行检测模型。三坐标测量机开始自

动检测地震物理模型,在选取下一个四边形时,要保证键入的四点坐标中有两点的坐标完全相同,达到边界完全衔接的目的。以此类推,将地震物理模型表面分割为多个部分,分别进行自动检测,直到整个模型测量完成。这种方式可以有效地规避自由曲面不能完全衔接所带来的误差。

### 1.4 任意多边形自动检测

使用相同设备对任意多边形自动检测程序进行修改和优化。优化后程序主要流程如图3所示。

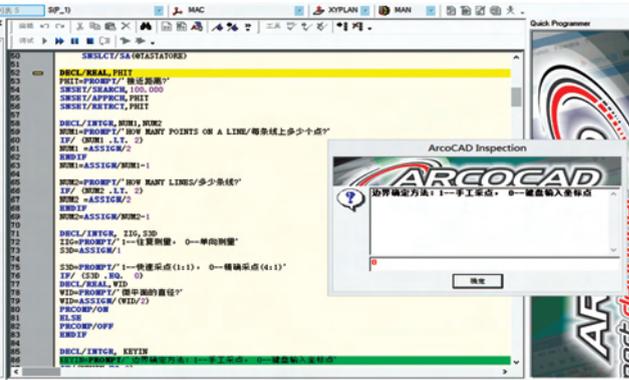


图2 四边形键入坐标式自动测量程序运行界面

Fig.2 Running interface of quadrilateral coordinate automatic measurement

该程序通过3~20顶点来定义多边形边界(多边形只能为凸多边形);定义结束后对该多边形的函数进行主成份分析,以确保测量点均匀分布,并确定被测曲面的方向;最后选择是否在键入坐标模式下进行。该软件的运行界面如图4所示。

## 2 地震物理模型中断层检测实例

### 2.1 测头校正

测头部分是测量机的重要数据采集系统。当测针与标准球接触发生形变时会发出一个开关信号,该信号被传送到控制系统后,控制系统对此刻光栅计数器中的数据锁存,再传送给计算机,表示测量一个点。

在测量过程中采用PH10M测头,测头包括3个电子接触器、前端红宝石探针以及自动旋转测座。当测杆接触物体使测杆偏斜时,至少有一个接触器断开,此时机器的X、Y、Z光栅被读出,这组数值表示此时的测杆球心位置。PH10M测头采用偏心转动原理,且测量软件显示的坐标数据不是测量机光栅数据,而是红宝石球中心数据。当红宝石球由于接触导致形变时,中心位置也会有所不同,如图5所示。此时红宝石球实际中心和系统默认的中心

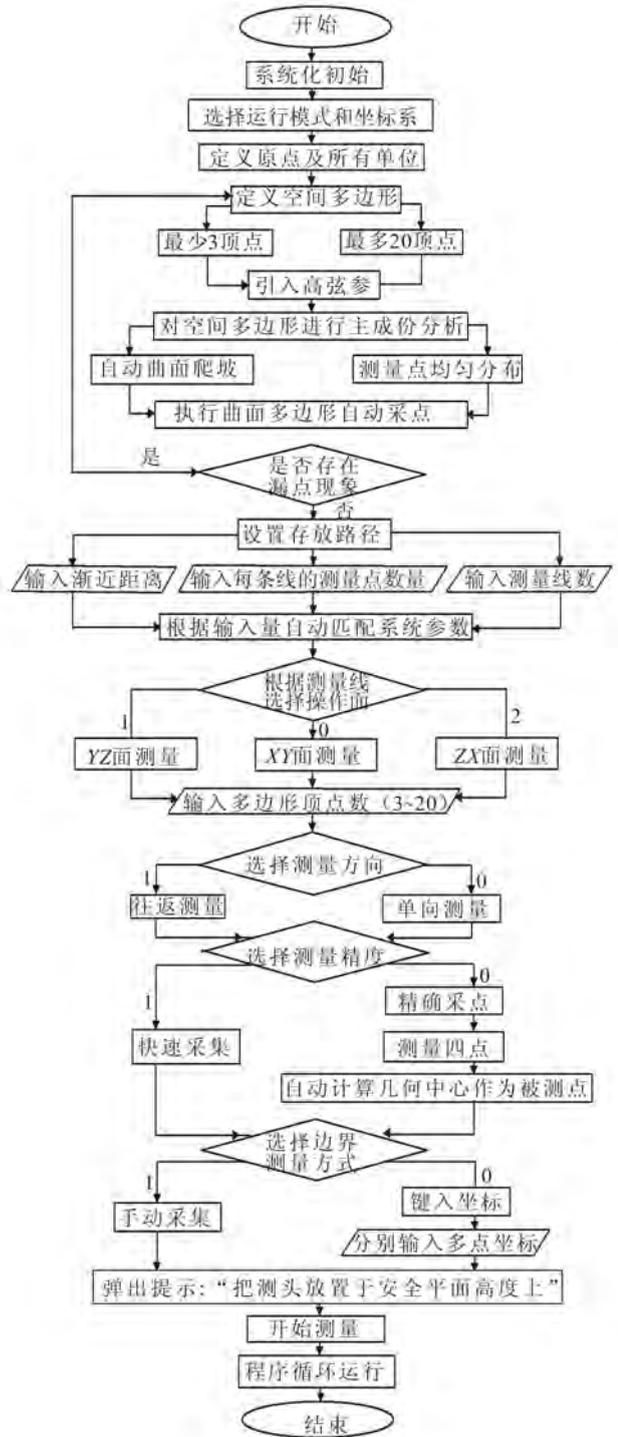


图3 任意多边形自动测量程序流程图

Fig.3 Flowchart of arbitrary polygon automatic measurement

之间会产生一个误差 $\Delta$ ,为消除此误差,每次更换角度前必须重新校正,一般是从标准球上取五个点来校正(可以在测量前将全部使用的角度预先校准好)。

### 2.2 选择建系方法

#### 2.2.1 模型建系法

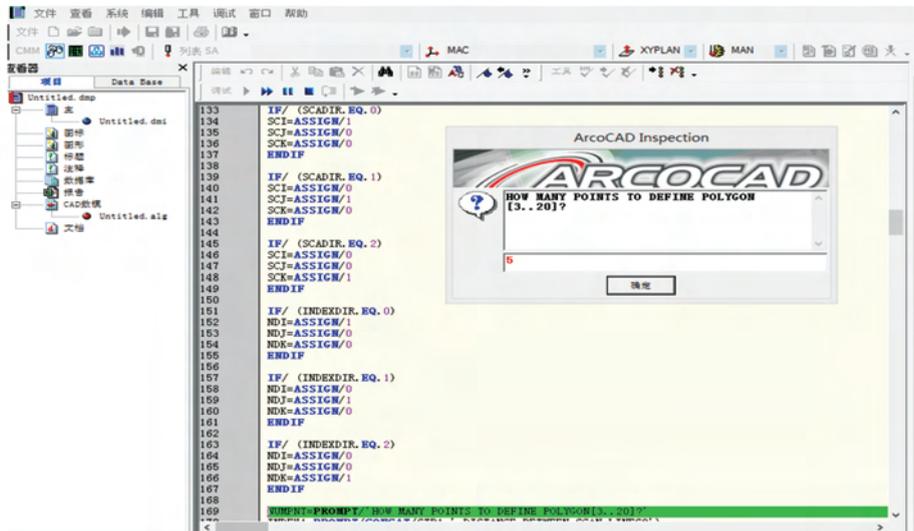


图 4 任意多边形自动测量程序运行界面

Fig.4 Running interface of arbitrary polygon automatic measurement

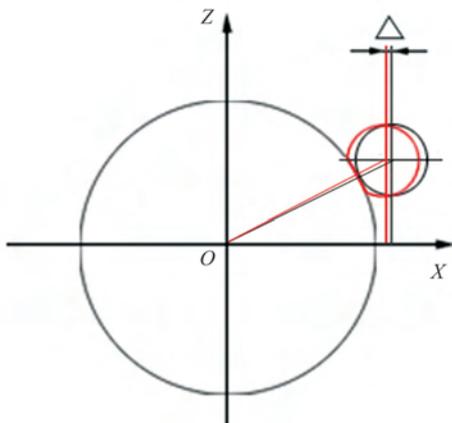


图 5 测头校准原因说明

Fig.5 Reason for the calibrating the probe

模型建系法是先利用三坐标测量系统中的默认坐标系(在 ARCO CAD 中称为“MAC”)对地震物理模型校准,用软件找正来代替物理校准,此过程的目的就是要建立一个不同于机床坐标系的坐标系,称为“模型坐标系”。这相当于将坐标系直接建立在被测模型上。

这种方法需要被测模型有足够的规则形体,例如:等高面、圆孔、圆柱、球等。而在断层中很难找到这类规则形体。因此若要移植此方法,则必须对地震物理模型做简单的改造:每次在模型基底上连接三个标准球(或凿三个圆形孔),通过测量三个标准球的球心(三个圆孔的圆心投影位置)来建立坐标系,确定原点。将机床坐标拟合在物理模型坐标上,保证仪器测量范围内模型上的各个点相对位置不

变。

该坐标法具有精度高、有效减少人为因素的优点,但其缺点是工作量大,每个物理模型都需要在基底上连接标准球。

### 2.2.2 机床坐标法

机床坐标法是为提高采集效率,减少工作量而直接使用机床坐标系,不需要另外建立其他坐标系。在测量开始前需要制作一个针对不同大小模型都可以使用的装槽来固定模型(装槽采用三个半球形呈  $90^\circ$ ,从模型两个侧面固定),保证它的绝对位置不变。此坐标法具有工作量大、易于操作的优点,但相较于模型建系法而言,会产生一个可估计的误差。

## 2.3 自动检测实例

在软件系统中分别导入原有的四边形自动检测程序和更改后四边形键入坐标式自动检测程序及任意多边形自动检测程序,并分别运行比较差异。以塔里木盆地塔中 26 井区某处断层为例(图 6),采用英国雷尼绍公司研制的 PH10M 自动旋转测头结合三坐标测量机,对修改后的程序在断层表面形态模拟中的实用性进行检验(图 7)。

从图 7 中可以看到数据右上方有一处数据缺失,由于数据量较大,不易观察区别,所以利用 Geomagic 对所得数据做抽稀处理后再比较异同。

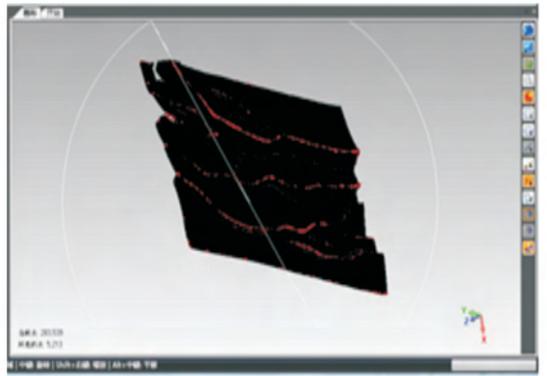
### 2.4 数据处理后的对比结果

对原有的四边形自动检测程序所得结果进行数据处理:(1)在点界面中执行体外孤点,为保证数据的准确性,敏感性调至 95%,将选中的红色部分点删除,如图 8(a)所示;(2)对数据进行统一采样处

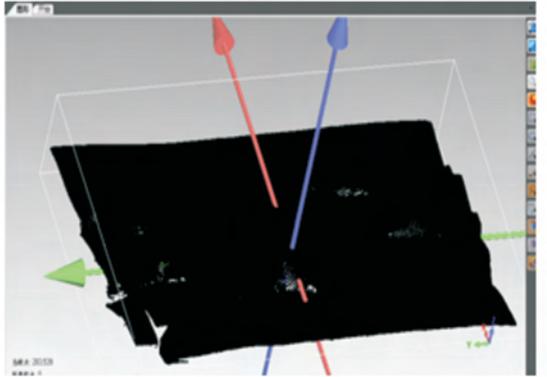


图6 塔里木盆地塔中26井区某断层模型

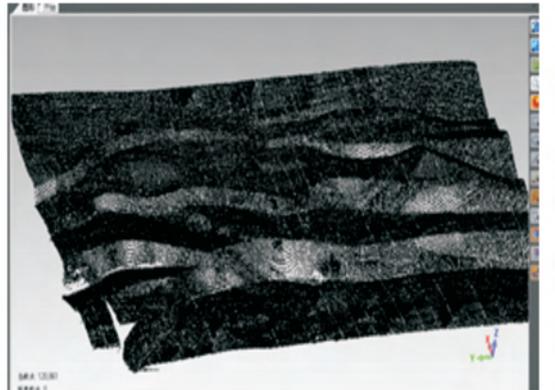
Fig.6 Model of a fault in Tazhong-26 well area, Tarim Basin



(a) 体外孤点处理



(b) 统一采样



(c) 曲率抽稀

图8 数据处理

Fig.8 Data processing



(a) 原有程序



(b) 优化后程序

图7 原有程序及优化后程序的数据模型

Fig.7 Data models of the original program and optimized program

理,设置连续两点最小距离,并依照此距离自动生成坐标系,如图8(b)所示;(3)为保证断层数据完整性,将曲率最小值优先进行抽稀,结果如图8(c)所示;(4)为便于观察,最后再对数据模型进行统一采样处理(选择保留数据百分比50%),结果如图9(a)所示。

按相同的方法步骤对更改后四边形键入坐标式自动检测程序和任意多边形自动检测程序所得结果进行数据处理,结果如图9(b)所示,并与修改前的结果[图9(a)]进行对比。

图9(a)因数据采样不能键入坐标,无法保证四边形完全拼接,所以测头垂直向下将整个模型表面

作为一个四边形进行测量。可以看到右上角有一个明显的的数据缺失,原因是此处有一条断层阻挡了测头,使得测头无法测量到该断层处数据。将造成数据缺失的断层处放大,被阻挡部分如图10黑色部分所示。如不更改程序,此时需重新定义数据缺失的曲面部分,再次进行测量,完成后叠加两次测量数据做抽稀处理。

在程序修改后[图9(b)],在断层处直接更换测头角度测量,测头角度取为 $45^\circ$ ,记录更换角度时的两点坐标,将断层部分作为一个独立四边形(或任意多边形)进行测量,如图11黑色部分所示。在角度

更换完成后键入所记录坐标,并再次记录其中两点坐标,作为下一个被测四边形(或任意多边形)的一条边,以延伸下一个被测多边形。依此类推,测量任务可一次完成。这样满足了多边形完全拼接,且测头角度可以多次选择。从扫描结果可以看到,断层处的数据完整且边界部分并没有数据缺失或数据重叠。

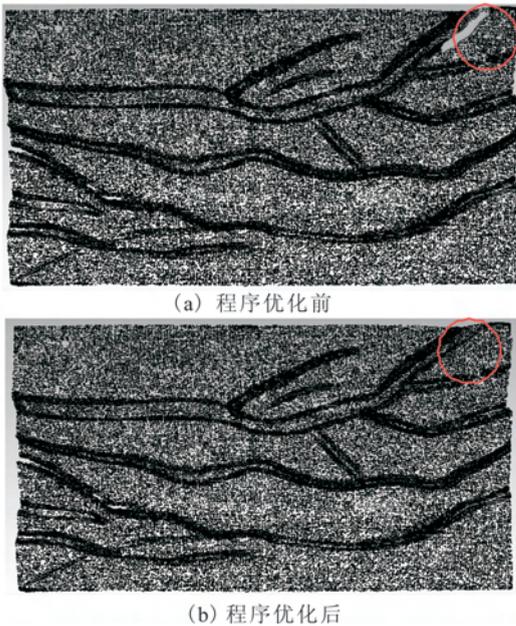


图 9 程序优化前、后自动检测结果

Fig.9 Automatic testing results before and after the program optimization

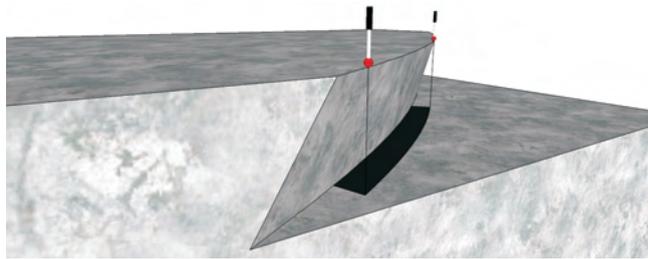


图 10 测头被断层阻挡部分

Fig.10 The probe blocked by the fault

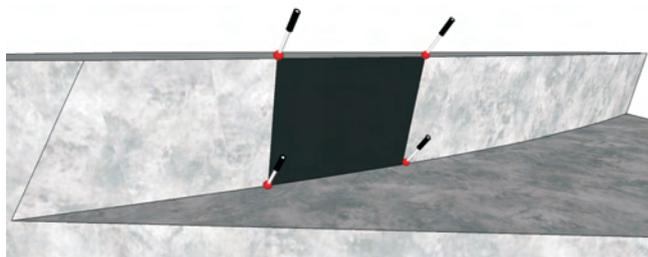


图 11 部分断层作为四边形分次测量

Fig.11 Measurement of part of the fault as a quadrilateral

### 3 结论与讨论

本文针对断层表面形态三维测试的需求,以三坐标测量机作为模型的测量装置,DMIS 作为开发程序,利用计算机控制技术将机械行业中的空间曲面自动测量程序修改并应用到断层表面形态检测中,并通过实例给出了地震物理模型和断层的三维表面形态检测方法步骤。取得以下主要成果:

(1) 对于空间自由曲面而言形成了四边形键入坐标式自动检测程序;

(2) 将四边形自动检测程序优化为任意多边形自动测量程序(3~20 顶点的凸多边形);

(3) 给出了两种针对断层三维表面形态检测的建系方法:模型建系法和机床建系法;

(4) 将原有的手动接触式测量更改为自动接触式测量,原先需多次更换角度才能完成的测量任务,现一次即可完成多角度自动检测。克服了断层表面更换角度测量时边界不能完全衔接的问题,并将四边形拼接衍生为任意多边形拼接,提高了测量精度,缩短了工作时间。同时省去了重复数据抽稀、曲面重建等较为复杂的数据处理过程,从而降低了后期数据处理的难度。总之,通过 DMIS 平台将此两款程序导入测量系统的配套软件中,从而将自动测量技术移植到断层表面形态的检测中,对于地质勘探行业、DMIS 程序开发行业、逆向工程行业都有一定利用价值。

### 参考文献(References)

- [1] 车爱兰,吴志坚.黄土斜坡震害面波勘探调查及其动力稳定性分析——以甘肃岷县、漳县  $M_s6.6$  地震为例[J].地震工程学报,2013,35(4):724-729.  
CHE Ai-lan, WU Zhi-jian. Surface Wave Investigation and Dynamic Stability Analysis for Earthquake-induced Loess Landslides [J]. Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 724-729. (in Chinese)
- [2] 宋健,高广运,陈青生,等.近断层地震动作用下土质边坡动力响应研究[J].地震工程学报,2013,35(1):62-69.  
SONG Jian, GAO Guang-yun, CHEN Qing-sheng, et al. Dynamic Response of Soil Slope under the Action of Near Fault Ground Motion [J]. Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 62-69. (in Chinese)
- [3] 崔亚新,丁凤娥.基于三坐标测量机的逆向工程技术概述[J].吉林工程技术师范学院学报:工程技术版,2004,20(9):9-11.  
CUI Ya-xin, DING Feng-e. Study on Reverse Engineering Based on Coordinate Measuring Machine [J]. Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology: Engineering Technology Edition, 2004, 20(9): 9-11. (in Chinese)

- [4] 余小勇.基于 DMIS 和 UG 的 CMM 检测路径生成及仿真[J].现代电子技术,2006(1):119-122.  
XU Xiao-yong. Form and Simulation of CMM Measuring Track Based on DMIS and UG [J]. Modern Electronics Technique, 2006 (1): 119-122. (in Chinese)
- [5] 邹刚,王亚平,李永刚.三坐标测量机测量路径自动生成研究[J].理论与实践,2004,24(3):6-7.  
ZOU Gang, WANG Ya-ping, LI Yong-gang. Research about Measuring Path Auto-generation of CMM [J]. Theory and Practice, 24, 2004 (3): 6-7. (in Chinese)
- [6] 宋春刚,兰诗涛,王文.自由曲面的接触式测量路径规划方法研究[J].机电工程,2003,20(5):3-5.  
SONG Chun-gang, LAN Shi-tao, WANG Wen. Research on the Path Planning of Contact Measurement for Free Form Surfaces [J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2003, 20 (5): 3-5. (in Chinese)
- [7] 李锋.面向坐标测量技术的 DMIS 标准的研究与软件接口开发[D].西安:西安理工大学,2004.  
LI Feng. The Study of DMIS Associated with CoOrdinate Measuring Technology & Development of Interface Software [D]. Xi'an: Xi'an University of technology, 2004. (in Chinese)
- [8] 意大利 Metro Staff 公司北京代表处. ARCO CAD 用户手册[M].2010.  
Beijing Representative Office of Italy Metro Staff Company. CAD ARCO User Manual [M]. 2010. (in Chinese)
- [9] Brian Overland. C++ 语言命令详解[M].北京:电子工业出版社,2000.  
Brian Overland. C++ Language Command [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. (in Chinese)
- [10] HUANG Yun-bao, QIAN Xiao-ping. Dynamic B-splinesurface Reconstruction: Closing the Sensing-and-modeling Loop in 3D Digitization[J]. Computer Aided Design, 2007, 39 (11): 987-1002.

\*\*\*\*\*  
(上接 1114 页)

- [11] Gassmann F. Elasticity of Porous Rock [J]. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 1951, 96: 1-21.
- [12] White J E. Underground Sound: Application of Seismic Waves [M]. Elsevier Science Publishing Co Inc, 1983.
- [13] Nur A, Simmons G. The Effect of Saturation on Velocity in Low Porosity Rocks [J]. Earth Planet Sci Lett, 7: 183-193.
- [14] Brown R, Korringa J. On the Dependence of the Elastic Properties of a Porous Rock on the Compressibility of the Pore Fluid [J]. Geophysics, 1975, 40(4): 608-616.
- [15] Yan J, Lubbe R, Pilar N. Variable Aspect Ratio Method in the Xu-White Model for AVO [C] // EAGE 69th Conference & Exhibition, 2007.
- [16] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic Wave Velocity in Heterogeneous and Porous Media [J]. Geophysics, 1956, 21 (1): 41-702.
- [17] Wyllie M R J, Gardner G H F. An Experimental Investigation of Factors Affecting Elastic Wave Velocity Porous Media [J]. Geophysics, 1958, 23 (3): 459-493.
- [18] Bourbie T, Zinsner B. Hydraulic and Acoustic Properties as a Function of Porosity in Fontain Bleau Sandstone [R]. Institut Français du Pétrole, 1985.
- [19] 文雯,陈宇军,王珏,等.地震安全性评价中地震动衰减关系的类型及其选取[J].地震工程学报,2013,35(3):709-713.  
WEN Wen, CHEN Yu-jun, WANG Jue, et al. Type and Selection of the Ground Motion Attenuation Relations during Seismic Safety Evaluation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 709-713. (in Chinese)