

# 基于改进的三维 Douglas-Peucker 算法的多波束测深数据抽稀方法

窦世卿<sup>1,2</sup>, 刘成军<sup>2</sup>, 林亚文<sup>3</sup>, 丁威<sup>4</sup>

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 黑龙江科技大学矿业工程学院, 哈尔滨 150022

3. 北京地林伟业信息技术有限责任公司, 北京 100036

4. 广州中海达卫星导航技术股份有限公司, 广州 511400

**摘要** 为压缩海量多波束测深数据, 提出了一种利用三维 D-P 算法进行多波束测深数据抽稀的方法。首先对三维 D-P 算法中首基面的确定进行改进, 使得算法运行效率提高数十倍, 然后利用该算法对中国北部某海域的多波束测深数据进行数据抽稀的实验和验证, 取得了较好的实验效果, 表明该方法能够较好地抽取海底地形的特征点信息, 适用于多波束测深数据的抽稀。该方法符合多波束测深系统的面测量模式, 实现了三维空间下的具有全局性特点的数据抽稀, 其渐进式数据选取方式, 可以为建立海底地貌 LOD(细节层次模型)提供不同精度要求的抽稀数据, 具有良好的应用前景。

**关键词** 多波束测深系统; 数据抽稀; 无格式 DTM; 三维 Douglas-Peucker 算法

**中图分类号** P237

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.19.002

## A Method of Multi-beam Echo Sounding System Data Thinning Based on Improved 3D Douglas-Peucker Algorithm

DOU Shiqing<sup>1,2</sup>, LIU Chengjun<sup>2</sup>, LIN Yawen<sup>3</sup>, DING Wei<sup>4</sup>

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2. College of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China

3. Beijing Forestry Information Technology Co., Ltd., Beijing 100036, China

4. Guangzhou Hi-Target Satellite Navigation Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, China

**Abstract** In order to compress the huge amount of multi-beam echo sounding data, this paper puts forward a new method of multi-beam sounding data thinning based on the 3D Douglas-Peucker algorithm. Firstly, determination of the initial base plane in the 3D Douglas-Peucker algorithm is improved, and the algorithm efficiency is increased by dozens of times. Then this algorithm is used for the data thinning experiment using the multi-beam sounding data of a sea area in the north of China, and good experimental results are achieved. Through comparison and analysis of the data thinning experimental results, it is shown that the feature points of the seabed terrain can well be extracted by the 3D Douglas-Peucker algorithm and this method is suitable for multi-beam echo sounding data thinning. It also fits the surface measurement model of a multi-beam sounding system, and can realize global data thinning in the three dimensional space. The way of progressive data selection can provide various required accuracies for LOD of underwater terrain. Therefore, it has a good prospect of application.

**Keywords** multi-beam echo sounding system; data generalization; unformatted DTM; 3D Douglas-Peucker algorithm

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171306)

作者简介: 窦世卿, 博士研究生, 研究方向为测绘和地理信息系统理论及应用, 电子信箱: 37929972@qq.com

引用格式: 窦世卿, 刘成军, 林亚文, 等. 基于改进的三维 Douglas-Peucker 算法的多波束测深数据抽稀方法[J]. 科技导报, 2014, 32(19): 21-25.

随着科学技术的发展,多波束测深系统已成为当今世界进行海底测量的先进技术手段之一。多波束测深仪具有几百到上千个波束,一次扇区(ping)扫描能获得海量的测深数据,从而将测量模式从原来的点、线测量模式扩展到面测量模式,可对水下地形地貌进行大范围、全覆盖的测量,极大地提高了测量的精度和效率,现已广泛应用于河道测量、港湾测量、浅海测量、深海测量等领域<sup>[1]</sup>。

海量的多波束测量数据在实际应用中存在很大的冗余性,也为数据的后处理和存储带来庞大负担。因此,多波束测深数据抽稀理论与方法成为多波束测深数据处理中不可或缺的一项关键技术。在目前较多的多波束测深抽稀方法中,基于规则格网的抽稀方法受格式的限制,虽然数据结构简单,易于管理,但容易造成地形失真<sup>[2]</sup>。刘春等<sup>[3]</sup>、冯宇瀚等<sup>[4]</sup>提出基于三角网的抽稀方法能够较好地保留地形特征点,但该算法是在平面位置上的抽稀算法。Bottelier等<sup>[5]</sup>、夏伟等<sup>[6]</sup>、卢银宏等<sup>[7]</sup>、秦茂芬等<sup>[8]</sup>将多波束测深数据中的每ping的测深剖面看作空间曲线,然后应用平面的Douglas-Peucker算法进行数据抽稀,但多波束测深系统属于面测量模式,将每ping的测深剖面看作一条空间曲线过于牵强,不够合理。本文提出利用三维Douglas-Peucker算法进行多波束测深数据抽稀的方法,实现三维空间中对数据的抽稀,具有全局性的特点,也符合多波束测深系统的面测量模式。

## 1 多波束测深数据抽稀的理论依据

### 1.1 多波束测深数据采集简介

多波束测深系统的测量模式是典型的面测量模式。在扫海测量时,测深通常是以测线为单位进行全覆盖条带式、多测深值海底地形采样,如图1所示。本文以美国RESON公司的SeaBat8125多波束测深系统为例,对多波束系统测深数据采集点的分布进行简要说明。SeaBat8125多波束测深系统声信号的发射和接收由发射阵和接收阵组成,如图2所示。对于每ping的接收指向性和发射指向性叠加后,形成了沿船横向,两侧对称的240个0.50×0.50波束,即每ping的测量过程得到了测船下方两侧对称的海底240个测深点的水深信息。假设某一条带测量得到的多波束测深数据ping数为 $m$ ,每一ping的波束个数为 $n$ ,则这个条带的测深点的总个数为 $mn$ <sup>[6]</sup>。

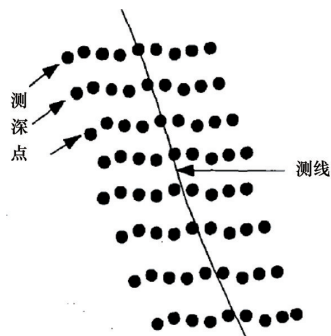


图1 扫海测量数据分布示意  
Fig. 1 Sketch of sounding data

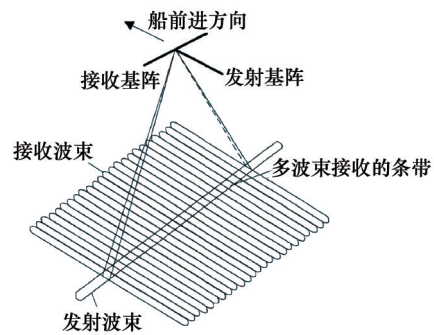


图2 多波束接收示意  
Fig. 2 Sketch of multi-beam echo sounding system receiver

### 1.2 多波束测深数据抽稀的基本思想

多波束测深数据的抽稀过程就是对海洋测量测深数据的选取过程,不同的数据选取方法对应着不同的抽稀结果,最终会导致构建的海底地形模型DTM(digital terrain model, 数字地面模型)的差异,即海底表征能力的差异。目前常用的海底地形模型的DTM结构有规则格网式DTM、不规则格网式DTM和随机分布的三维离散点式DTM 3种。3种格式的DTM之间是可以进行相互转换的,但在进行地形测量时,直接产生的是随机分布的三维离散式DTM形式。借用文献[9]中提出的“无格式DEM”的概念,即凡是用于描述地表高程变化,而不考虑具体格式的散点,散点式DEM可以称之为无格式DEM<sup>[9]</sup>,本文将离散点式DTM称为无格式DTM。

针对多波束测深数据的抽稀问题,可以使用其三维离散点这种无格式信息进行抽稀,本文所谓的多波束测深数据抽稀思想,即根据抽稀前后所需要的信息量衰减比,用三维Douglas-Peucker算法适当删除描述海底地形的次要点,而保留其主要的海底地貌特征点,从而得到简化的离散三维点集,然后在此基础上构建海底DTM的抽稀过程。

## 2 三维Douglas-Peucker算法原理及改进

### 2.1 三维Douglas-Peucker算法原理

Douglas-Peucker简化算法是通过相对简单的全局性递归运算,选出那些反映曲线总体及局部形态的主要特征点。该算法已经成为目前二维矢量数据LOD操作和综合的经典算法<sup>[10]</sup>。

费立凡等<sup>[11,12]</sup>在分析二维Douglas-Peucker算法原理的基础上,延伸扩展提出了严密的三维Douglas-Peucker算法(下文简称为3D D-P算法),并将此法应用到三维离散点的DEM自动综合。

3D D-P算法实现步骤为:

1) 矢量集原点和首基面的确定。对一随机分布的三维离散点集中的所有离散点两两求矢量积,选出其矢量积绝对值最大的一对,并将获得此矢量积最大绝对值的3个点分别

确定为原点(图3中的O点)、初始锚点(图3中的A点)和初始漂浮点(图3中的B点),3点确定的平面即为首基面。

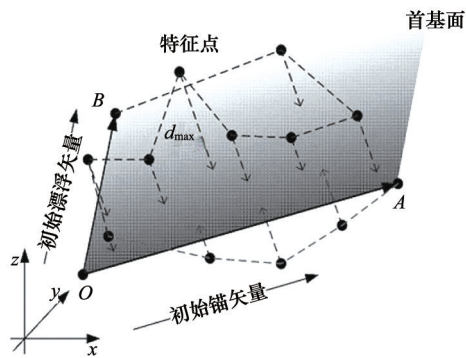


图3 三维D-P算法中的首基面与点面距

Fig. 3 Initial base plane and point-plane distance of the 3D D-P algorithm

2) 点集排序。对三维离散点进行排序处理。将初始锚矢量的终点作为点列的首点,接着依次寻找三维距离最近的下一个新点,并将初始漂浮矢量的终点作为整个点列的末点。

3) 数据简化。用原点、初始锚点及漂浮点构造一个基面,计算排序后的点列中初始锚点及漂浮点之间各点到基面的距离。如果  $d_{max}$  小于规定的阈值,则删除初始锚点及漂浮点间的所有点;否则,将有序点集分为两段,重复上述过程。

### 2.2 算法改进

3D D-P算法的首基面的确定对整个算法可以说起着至关重要的作用,但根据2.1节提到的方法(称为严密法指定首基面),为确定首基面的3个点而循环遍历所有数据的计算量

是相当可观的,算法时间复杂度为  $O(n^3)$ 。当数据量较大时,时间、成本开销难以承受。因此,考虑到实际上地表点集的分布特点,一般是水平方向上延展性很广,而在竖直方向上的起伏度相对很小,矢量积最大的面一定处在水平方向上,本文人为地给出O,A,B点确定一个首基面<sup>[13]</sup>,指定该点集中  $\{X_{min}, Y_{min}, Z_{min}\}$  所形成的点为原点O,再分别指定  $\{X_{min}, Y_{max}, Z_{min}\}$ 、 $\{X_{max}, Y_{max}, Z_{min}\}$  为初始锚点A和初始漂浮点B,从而确定为首基面。

具体实验中,所用计算机的配置为Intel Core i3 CPU,主频2.13G,2G内存,操作系统为Win7,经过实验验证,人为指定首基面与严密法选定首基面相比较,抽稀结果显示效果基本相同,时间效率上却提高了数十倍。

## 3 多波束测深数据抽稀实验研究与分析

### 3.1 数据准备与预处理

实验采用VC++编程实现了3D D-P算法,并使用surfer 8.0软件显示抽稀前后海底地形晕渲图和等值线图。

实验采用的多波束测深数据选取了中国北部某海区的多波束实测数据,数据经过了包括数据格式转换与读取、声速剖面数据处理、定位数据处理、潮位数据处理、姿态数据处理、深度数据处理、数据合并、滤波等预处理操作,在垂直方向上根据潮位数据把水深值转换到了深度基准面上,得到最终水深;在水平方向上,根据罗经和GPS数据将水深点的平面位置由船坐标系(x,y)转换到了大地坐标系中,实现测线间的衔接,最终生成了三维地理坐标水深数据<sup>[14]</sup>。原始海底地形晕渲图和等值线图如图4所示,海区地势变化稍大,东北方向地势变化较为明显,西南方向地势较为平坦,数据点个数为13432个,水深在-10.29~-18.01 m之间。

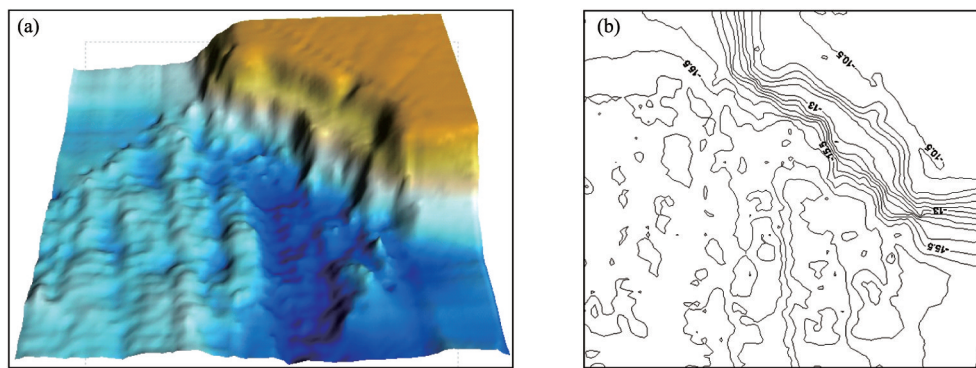


图4 原始海底地形晕渲图(a)和等值线图(b)

Fig. 4 Hill-shading map (a) and contour map (b) of original submarine terrain

### 3.2 实验与分析

#### 3.2.1 抽稀阈值的确定

抽稀阈值的大小将直接影响数据抽稀的比例和抽稀结

果,因此其确定至关重要。本文依据《国际海道测量规范》<sup>[15]</sup>对各等级测量的测量精度的测深固定误差值  $a$  确定0.25、0.50、1.00 m 3个阈值进行实验对比(表1)。

表1 海道测量最低标准

Table 1 Lowest standard of hydrographic survey

等级	特等	一等	二等	三等
改正后水深准确度 (95%置信度)	$a=0.25\text{ m}$ $b=0.0075$	$a=0.50\text{ m}$ $b=0.013$	$a=1.00\text{ m}$ $b=0.023$	同二等

可利用表1中  $a$  和  $b$  值计算深度准确度的限差

$\pm\sqrt{a^2+(bd)^2}$ ,  $a$  为测深固定误差, 即所有固定误差的总和;  $bd$  为测深误差, 即所有测深误差的总和;  $b$  为测深误差系数;  $d$  为水深。

### 3.2.2 抽稀实验及分析

根据海区测量中各等级测量精度要求的不同, 采用上述3个抽稀阈值进行了抽稀实验, 结果如图5和图6所示。

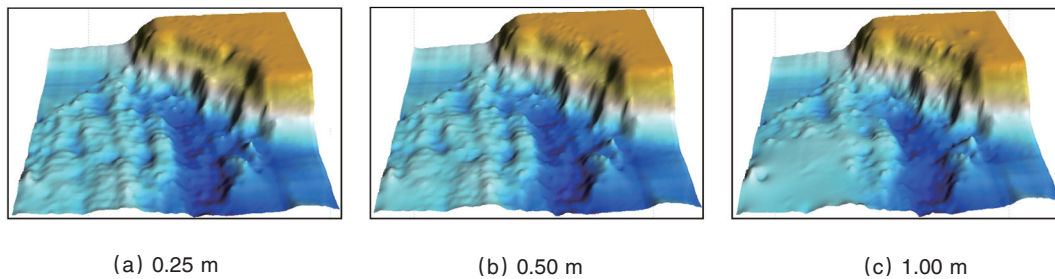


图5 采用3种阈值抽稀后晕渲图比较

Fig. 5 Comparison among hill-shading maps of data generalization using three different thresholds

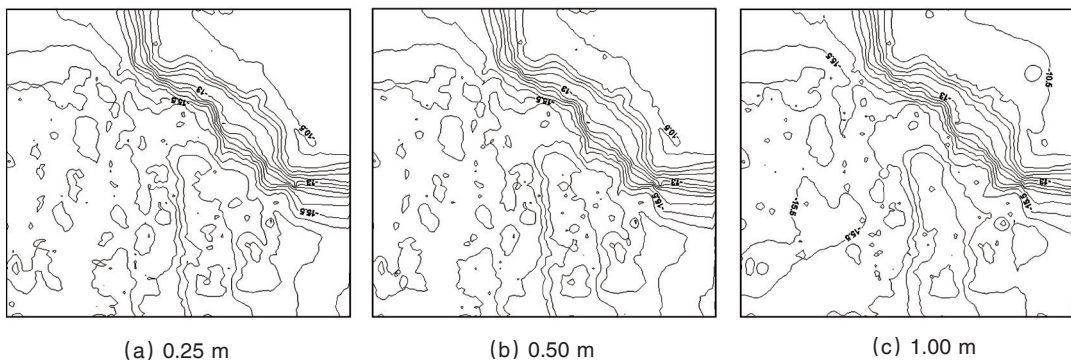


图6 采用3种阈值抽稀后等值线图比较

Fig. 6 Comparison among contour maps of data generalization using three different thresholds

对本海区实验数据采用不同的抽稀阈值进行实验, 对抽稀结果以及抽稀率进行统计, 如表2所示。

表2 不同阈值数据抽稀统计

Table 2 Statistics of data thinning using different thresholds

阈值/m	保留 点数	抽稀率/%	人工指定首基 面用时/s	严密法选定首 基面用时/s
0.25	9752	72	3.45	40.44
0.50	7149	53	3.16	40.14
1.00	3115	23	2.78	39.60

通过对实验数据采用不同抽稀阈值得到的抽稀效果图和统计数据对比, 可以得出以下结论:

1) 利用3D D-P算法可以实现三维空间下的以三维离散点为基础的多波束数据抽稀, 并且抽稀前后较好地保持了海底地形的主要地貌特征, 可以较好地提取出海底地貌的特征信息, 方法简单易行, 计算效率令人比较满意。

2) 利用3D D-P算法的抽稀过程是一个渐进的离散点选取过程, 这非常有利于海底地貌的多层次动态式抽稀, 可以为建立海底 LOD(细节层次模型)快速、实时提供不同精度要求的抽稀数据。

3) 在使用3D D-P算法的过程中, 基面会不断变化, 因此算法具有一定的全局性特点。

4) 本次实验中当阈值为1, 抽稀率达到20%左右, 保留点数过少, 抽稀率较低时, 海底地貌有些区域变形较大, 分析原因应该是在首基面的原点对角线的两端点位因受到基面族的辐射效应影响, 被抽稀的较多, 导致了抽稀点分布的不均

匀性,这种不均匀性在阈值为0.25和0.5 m时受影响程度显示不明显。

#### 4 结论

利用改进的三维Douglas-Peucker算法对海量多波束测深数据进行了抽稀实验及验证,实现了三维空间下的具有全局性特点的多层次动态抽稀过程,通过上文对3D D-P算法的讨论和实验可以看出,该方法能够较好地抽取海底地形的特征点信息,能够适用于多波束测深数据的抽稀,但是在局部小的区域内仍然会丢失一部分特征信息,而且该方法和抽稀阈值大小的选择和海底地形的变化也密切相关,如何合理地选择抽稀阈值就是海道测量作业人员必须要解决的问题。下一步将考虑对该方法进行进一步改进,一方面使其抽稀结果更趋合理,另一方面也使抽稀阈值的选取和海底地形变化达到最优匹配,实现海底的完善探测与显示,并在抽稀过程中适当考虑航海图的“宁浅勿深”的安全性准则以及海底地形探测的完善性等准则<sup>[6]</sup>。

#### 参考文献(References)

- [1] 郑庆涛. 多波束与单频测深技术应用比较[J]. 水利水电自动化, 2007(1): 25-29.  
Zheng Qingtao. Application comparison between multi-beam sounding technology and single-frequency sounding technology[J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2007(1): 25-29.
- [2] 胡海, 吴艳兰, 胡鹏. 数字高程模型精度标准、质量理论和科学观念讨论[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(6): 714-716.  
Hu Hai, Wu Yanlan, Hu Peng. Discussion of DEM standards, quality theory and conceptions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(6): 714-716.
- [3] 刘春, 吴杭彬. 基于平面不规则三角网的DEM数据压缩与质量分析[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(5): 836-840.  
Liu Chun, Wu Hangbin. Data compress of DEM based on plane triangulation irregular network[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(5): 836-840.
- [4] 冯宇瀚, 殷晓冬, 王少帅, 等. 基于三角网构建海底DEM的抽稀算法[J]. 海洋测绘, 2012, 32(6): 33-35.  
Feng Yuhan, Yin Xiaodong, Wang Shaoshuai, et al. A method for data thinning based on the topology of triangulation irregular net to construct submarine DEM[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(6): 33-35.
- [5] Bottelier P, Haagmans R, Kinneging N. Fast reduction of high density multi-beam echo sounder data for near real-time applications[J]. The Hydrographic Journal, 2000, 98(10): 23-28.
- [6] 夏伟, 黄谟涛, 刘雁春, 等. Douglas-Peucker算法在多波束测深数据抽稀中的应用[J]. 测绘科学, 2009, 34(3): 159-160.  
Xia Wei, Huang Motao, Liu Yanchun, et al. Application of Douglas-Peucker method in multibeam echo sounding system data thinning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(3): 159-160.
- [7] 卢银宏, 岳东杰, 宋飞凤. 基于总体最小二乘的Douglas-Peucker算法在多波束测深数据抽稀中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(2): 4-5.  
Lu Yinhong, Yue Dongjie, Song Feifeng. Application of Douglas-Peucker algorithm based on total least square in data thinning of multibeam sounding[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(2): 4-5.
- [8] 秦茂芬, 李珂. 矢量曲线简化方法在多波束测深数据中的应用[J]. 科技创新导报, 2011(15): 79-81.  
Qin Maofen, Li Ke. The application of vector curve simplified method in multi-beam sounding data thinning[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011(15): 79-81.
- [9] 何津, 费立凡, 黄丽娜, 等. 三维Douglas-Peucker算法的等高线间接综合方法研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 467-473.  
He Jin, Fei Lifan, Huang Lina, et al. Study on the method of indirect generalization for contour lines based on the 3D Douglas-Peucker algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 467-473.
- [10] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. The Canadian Cartographer, 1973, 10(2): 112-122.
- [11] 费立凡, 何津, 马晨燕, 等. 3维Douglas-Peucker算法及其在DEM自动综合中的应用研究[J]. 测绘学报, 2006(8): 278-284.  
Fei Lifan, He Jin, Ma Chenyan, et al. Three dimensional Douglas-Peucker algorithm and the study of its application to automated generalization of DEM[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(8): 278-284.
- [12] Fei L F, He J. A three-dimensional Douglas-Peucker algorithm and its application to automated generalization of DEMs[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(6): 703-718.
- [13] 何津, 费立凡. 再论3维Douglas-Peucker算法及其在DEM综合中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(2): 160-163.  
He Jin, Fei Lifan. Further study on three dimensional douglas-peucker algorithm and its application to generalization of DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(2): 160-163.
- [14] 吴英姿. 多波束测深系统地形跟踪与数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001: 80-99.  
Wu Yingzi. A study on multi-beam sounding system seafloor tracking & data processing techniques[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001: 80-99.
- [15] International Hydrographic Organization. IHO Standards for hydrographic surveys (S-44) [S]. 4th ed. The Principality of Monaco: International Hydrographic Bureau, 1998: 4-5.
- [16] 夏伟, 黄谟涛, 刘雁春, 等. 多波束测深数据抽稀准则研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(4): 17-19.  
Xia Wei, Huang Motao, Liu Yanchun, et al. Research on the rule of multibeam echo sounding system data thinning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(4): 17-19.

(责任编辑 刘志远)