引文格式：夏袁菡子,周胜洁,邸国辉. 顾及地形断裂线的高保真DEM重建研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 20-24. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.005

顾及地形断裂线的高保真DEM重建研究

夏袁菡子[1]，周胜洁[1]，邸国辉[1]
（1. 湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司，湖北 武汉 430070）

摘　要：数字高程模型（DEM）是目前最重要的地球信息三维基础产品之一，但在植被茂盛等造成地形突变处点云密度低的情形下，生成的DEM局部误差偏大，出现不同程度的失真。针对DEM生产过程中的突变地形，基于法向量法来提取断裂线，提出了以虚拟断裂线法或拓扑断裂线法来表达断裂线。实验分别利用克里金插值法和径向基函数法来重建DEM，通过比较LiDAR脚点缺失、虚拟断裂线少点、虚拟断裂线密集点以及拓扑断裂线法4个不同组别所产生的高程误差，得到如下结果：引入拓扑断裂线法后，克里金法生成的DEM中误差为0.14 m，比点云缺失时中误差减少0.511 m，径向基函数法生成的DEM中误差为0.13 m，比点云缺失时中误差减少0.515 m，实验效果表明在点云密度不足的情况下，拓扑断裂线法在2种插值算法中均适用。

关键词：LiDAR；断裂线；DEM；克里金插值法；径向基函数法
中图分类号：P284　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）02-0020-05

Research on High Fidelity DEM Reconstruction Considering Terrain Fracture Lines

XIA Yuanhanzi[1], ZHOU Shengjie[1], DI Guohui[1]
(1. Hubei Institute of Water Resources Survey and Design Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Digital elevation model (DEM) is currently one of the most important 3D basic products for Earth information. However, in situations where point cloud density is low caused by lush vegetation and other factors, the generated DEM has a large local error, resulting in varying degrees of distortion. We focused on the sudden terrain changes in the DEM production process, used the normal vector method to extract fault lines, and proposed using virtual fault line method or topological fault line method to express fault lines. We used Kriging interpolation method and radial basis function method to reconstruct DEM, and compared the elevation errors generated by four different groups of LiDAR, such as missing foot points, few virtual fault lines, dense virtual fault lines, and topological fault line method. The results show that after introducing the topological fault line method, the mean square error of DEM generated by Kriging method is 0.14 m, which is 0.511 m less than that generated by point cloud missing. The mean square error of DEM generated by the radial basis function method is 0.13 m, which is 0.515 m less than that generated by point cloud missing. The experimental result indicates that the topological fracture line method is suitable for both interpolation algorithms in the case of insufficient point cloud density.

Keywords: LiDAR, fracture line, DEM, Kriging method, radial basis function

地形表面通常是不光滑的，变化并不均匀，地面因而会发生转折或突变，这些地方统称为地形断裂线[1]。广泛应用的Delaunay三角网法是基于三角形内角规则构成三角网，但由于它在构网过程中没有考虑断裂线，使得地形突变处在点云密度低的情形下生成的DEM局部误差较大，造成DEM的局部失真。为此学者们围绕修复失真DEM展开了一些研究。王婷婷[2]研究了机载LiDAR点云数据进行数据处理的方法，通过对断裂线辅助机载生产DEM的技术进行研究，得到了几种地形下的人工干预断裂线的方法。周波等[3]针对DEM在生产过程中的失真现象，采用了最小二乘法及随机抽样一致性算法对其平面方程进行参数估计，提出了用地形特征来约束失真DEM形态结构的失真修复方法。彭检贵等[4]通过利用离散点构建无约束TIN，边缘检测算法提取地形断裂特征作为约束构建约束TIN，提出了一种顾及地形特征的山区LiDAR高精度DEM提取算法，得出该算法较传统算法在地形细节的保留上更具优势。

由于植被、建筑物的影响，经过滤波后，在地形断裂线附近可能出现LiDAR点云的缺失，而现有文献中大多数点云数据生成DEM的实验中一般只比较几种插值函数的优劣，而未考虑到断裂线；另外以前的考虑断裂线的DEM生成方法大多都是基于三角网法进行研究，且数据结构较为复杂，不利于实际生产。所以

项目来源：湖北省水利重点科研项目（HBSLKY202112）。
第一作者简介：夏袁菡子（1993—），硕士，工程师，从事于航空摄影测量方面的工作，E-mail：694885864@qq.com。

在只有点云数据生成DEM且点云密度不足的情况下，本文结合法向量计算提出一种新的顾及断裂线的高保真DEM重建算法。

1　原理与方法

1.1　技术路线

基于机载LiDAR采集、分类后的点云数据，分别采用克里金插值法、径向基函数法，辅以在突变地形区附近添加断裂线文件作为约束条件，对于LiDAR缺失地区的断裂线采用虚拟断裂线法和拓扑断裂线法来重建DEM，以此研究解决该地形区域高程数据不足的问题。本文技术路线如图1所示。

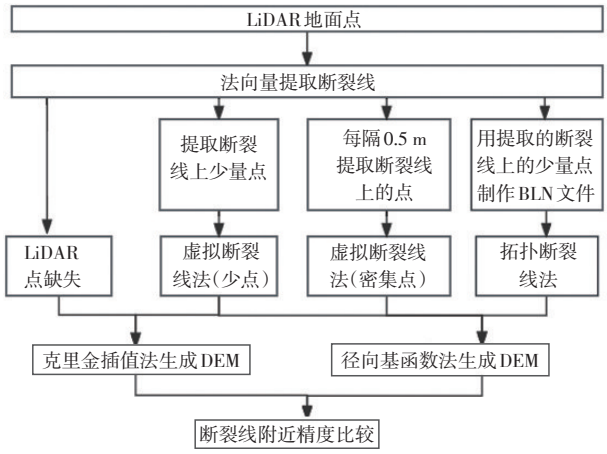


图1　技术路线

1.2　法向量计算

对于本实验，若断裂线提取不准确，实验结果会产生较大误差。如图2所示，假设PQ为真实断裂线，$P'Q'$为错误断裂线。则任一点R点的误差为$\Delta h = h_{R'} - h_R$。假设PP'为d，PQ为L，偏移角度为∂，R点坐标为（x，y）。通过几何运算可以得出，误差$\Delta h = \dfrac{L\tan\partial - d - x}{\tan\partial}$。

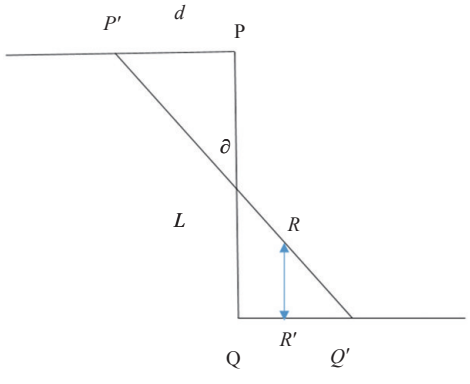


图2　断裂线示意图

由于断裂线的突变转折使得位于断裂线两侧的面片法向量之间会存在明显的差异，所以通过法向量变换后会呈现清晰的夹角[5]，我们引入法向量方法来提取断裂线。将离散的LiDAR点云按照Delaunay规则构建二维不规则三角网模型。利用三角网顶点的三维坐标计算每个三角网面片的法向量（垂直于三角面的向量），如图3所示。

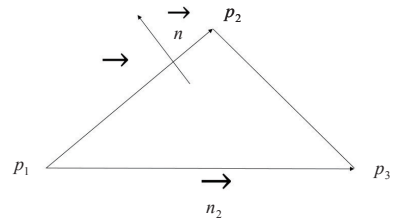


图3　三角形面片的法向量

面片法向量求解如下：

$$\vec{n} = \overrightarrow{n_1} \times \overrightarrow{n_2} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\overrightarrow{n_1} = (x_2 - x_1)i + (y_2 - y_1)j + (Z_2 - Z_1)k \tag{2}$$

$$\overrightarrow{n_2} = (x_3 - x_1)i + (y_3 - y_1)j + (Z_3 - Z_1)k \tag{3}$$

式中，(x_1, y_1, z_1)，(x_2, y_2, z_2)，(x_3, y_3, z_3)分别为点P_1，P_2，P_3的三维坐标；$\overrightarrow{n_1}$，$\overrightarrow{n_2}$分别为三角形两条边的向量；$\vec{n}$为所求的法向量。

利用CloudCompare软件计算分类后的点云法向量，并对法向量分级赋予HSV色彩，由于法向量的特性，断裂线清晰可见。再通过MapMatrix 3D软件点云测图功能通过逐点捕捉绘制断裂线，确保断裂线空间位置、高程的准确性。

1.3　克里金插值法

克里金插值法又称空间自协方差最佳插值法，克里金内插实际上也是加权平均，离采样点越近权重越大，当采样点距离插值较远时，权重可以忽略不计。但不同的是权重系数的确定，在克里金插值法中，权重不仅取决于采样点与插值点之间的距离，还取决于采样点之间的整体空间位置关系。

要在权重中使用空间排列，必须量化空间自相关，半变异函数是空间描述和空间预测之间的关键步骤，根据插值点有限范围内的若干采样点数据通过创建变异函数和协方差函数估算其空间自相关性[6]。所谓变差是指具有一定间隔的两数据值差之平方的平均值，其数学表达式为：

$$2r(d) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Z_i - Z_{i+d})^2 \tag{4}$$

式中，Z_i和Z_{i+d}为2个具有间隔d的高程值；$r(d)$为变差的一半。$r(d)$可由幂函数来逼近，其式表达如下：

$$2r(d) = \mathrm{A} \times d^{\mathrm{b}} \tag{5}$$

式中，A和b为2个常数。

要构建一个表面，将研究区域中的每个位置或单元中心进行预测。克里金内插结果式能够满足内插点(x,y)处的估计值z与真实值H的差最小的一套最优解[1]，即

$$\mathrm{Var}(Z-H)=\min \tag{6}$$

同时满足无偏估计的条件：

$$E(Z-H)=0 \tag{7}$$

克里金法首先考虑的是高程在空间位置上的变异分布，确定对一个待插点值有影响的距离范围，然后用此范围内的参考点来估计待插点的高程值，在估权时也考虑给数据聚集点一较小的权。

1.4 径向基函数法

径向基函数（radial basis function，RBF）是一个以某一点为中心，以此点到其他所有数据点的距离（一般使用欧氏距离）为核心，取值仅仅依赖于离原点距离的实值函数[7]。径向基函数形式可以表示为：

$$f(x)=\sum W_i\times\phi(\|x-c_i\|) \tag{8}$$

式中，x为输入样本；W_i为待求系数；c_i为中心点；$\varnothing$为径向基函数；$\|x-c_i\|$为输入样本与中心点之间的距离。

1.5 BLN边界文件介绍

Surfer21.1软件中，克里金插值法和径向基函数法都支持添加断层线Breaklines。断层线Breaklines代表了由于地球运动而导致的坡度中断。一个断层线是一个2d线，在网格化数据时起到一个障碍的作用，若故障线是一个封闭的多边形，则对该多边形之内（或之外）的原始数据点分区进行网格化。若故障线不是封闭的多边形，则先对多段线一侧的原始数据点进行网格化忽略另一侧，再对另一侧进行网格化。

Breaklines文件以Breaklines文件（* .BLN）格式存在。*.BLN文件是一种ASCII格式的文件，用来存储控件对象点、线和面的坐标，而不涉及属性。将所绘制的断裂线导出成dxf格式，提取其中某一明显断裂线作为实验对象。

2 DEM建模与精度分析

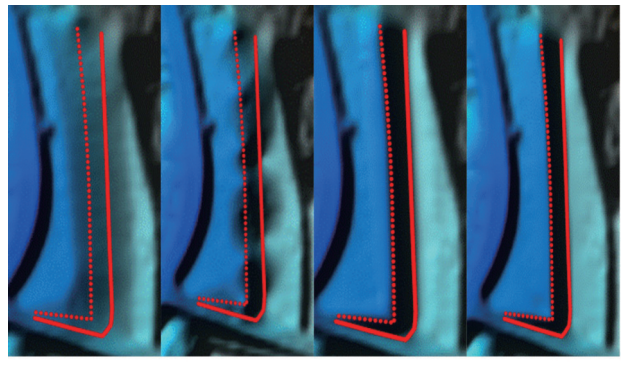
2.1 DEM建模比较

本次实验所选数据为湖北省广水市某河道治理工程点云数据，总点数为97 677点，测区面积为0.07 km^2。分别取90%的数据作为实验组，10%的数据作为检核数据，选取一处明显的断裂线作为实验对象。本次实验分为4组，分别为A组（LiDAR点缺失）：删掉断裂线附近的数据后剩余数据（以下简称剩余数据）生成DEM。B组（虚拟断裂线少点）：提取断裂线上的少量关键点坐标，与剩余数据合并生成DEM。C组（虚拟断裂线密集点）：将断裂线进行高程加密，每隔0.5 m提取其三维坐标值生成约束条件数据，与剩余数据合并生成DEM。D组（拓扑断裂线法）：在剩余数据中加入断裂线文件（BLN数据形式），与剩余数据中合并生成DEM。

本次实验中，克里金插值法选择线性变差函数，根据实验数据软件得到的默认斜率为0.374 8，输入信息为点；设置搜索邻域为圆形，搜索半径为194；搜索扇区数为4个，每个扇区所使用的最大数据量为16，即所有扇区可使用的最大数据量为64；所有扇区内最小数据个数为8，更少则白化节点。构建DEM网格分辨率为1 m，网格数为268行×83列。

径向基函数法选择基函数为多二次曲面函数，根据实验数据软件得到的默认形状系数为0.073；设置搜索邻域为圆形，搜索半径为194，搜索扇区同克里金插值法。构建DEM网格分辨率为1 m，网格数为268行×283列。

4组数据用克里金插值法DEM重建后断裂线附近生成情况如图4所示。4组数据用径向基函数法DEM重建后断裂线附近生成情况如图5所示。

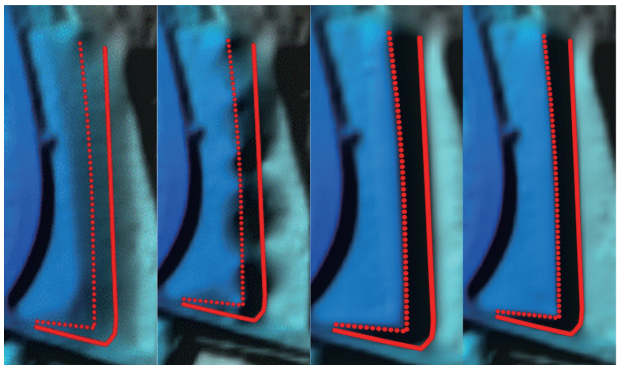


A组 B组 C组 D组

图4 克里金插值法DEM重建后断裂线附近生成情况

由图4和图5断裂线附近生成的几组DEM可以看出，克里金插值法与径向基函数法C、D组在加入约束条件后重建DEM，很好地表达了地形特征。而A组断裂线附近缺失了高程点，B组仅加入断裂线上高程点数据，其断裂线特征表达均较差。对比B、C组得出，其添加的断裂线上的数据点间距大小会明显影响生成的DEM精度，而加入断裂线文件由于表达了地形特征，显著提高了DEM精度。分析表明：如果断裂线附近出现了LiDAR脚点缺失，通过补充断裂线数据可

重建保真的DEM。



A组　　B组　　C组　　D组

图5　径向基函数法DEM重建后断裂线附近生成情况

2.2　DEM重建残差分析

交叉验证法是一种与用户无关、与DEM格网尺寸无关的实验方法，可以让用户将关注点集中于插值参数本身，本实验只讨论插值方法的实用性，暂不考虑点云数据采集精确度对插值结果的影响。实验中运用交叉验证法计算每一采样点的残差值，并通过残差值计算断裂线附近的检核点的中误差值，以此为基础，分析不同情形下“拓扑断裂线法”的优劣。

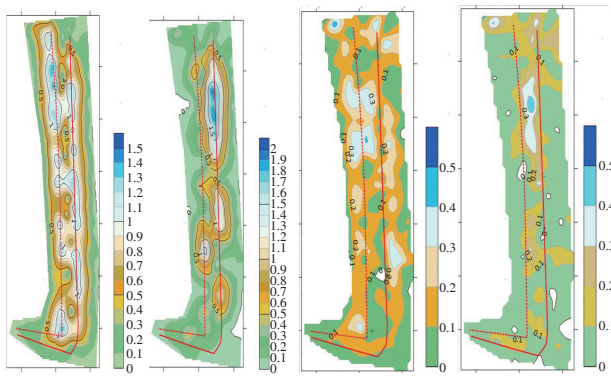
在surfer软件中，通过导入实验中预留的10%的检核点数据与不同插值法下不同组生成的DEM，可以得到每一组实验的残差值。提取断裂线附近的检核点的残差值，计算中误差。结果如表1所示。

表1　不同方法精度比较/m

范围	克里金插值法		径向基函数法	
	断裂线附近中误差	断裂线附近最大残差	断裂线附近中误差	断裂线附近最大残差
A组	0.651	1.471	0.645	1.428
B组	0.597	2.005	0.599	2.048
C组	0.167	0.482	0.166	0.454
D组	0.140	0.481	0.130	0.408

由上表可见，克里金法中，D组断裂线附近中误差比A组中误差小了0.5 m，最大残差比A组小了近1 m，中误差比B组小了0.46 m，最大残差比B组小了1.5 m。径向基函数法中，D组断裂线附近中误差比A组中误差小了0.52 m，最大残差比A组小了近1 m，中误差比B组小了0.47 m，最大残差比B组小了1.64 m。

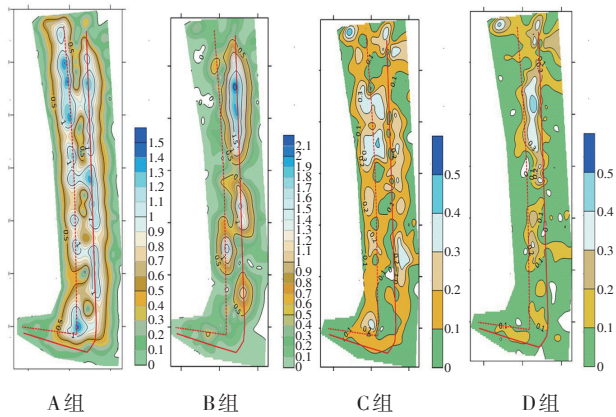
克里金法和径向基函数法中分别通过比较断裂线附近的最大残差，发现A、B组对断裂线附近的DEM重建精度影响很大，超出了最大允许误差（规范限差：0.67 m），而C、D组的高程中误差和残差明显减小，表明其DEM重建精度有显著改善，提高了坡度不连续地形特征的保真度。综合对比发现：虽然B组中加入了少量点作为约束条件，但仍不能有效的表达出断裂线，但是C组因为取点之间间距小能较好的表达出断裂线，但是方法较为复杂。而D组中的BLN数据，对断裂线表达较为简单。



A组　　B组　　C组　　D组

图6　克里金插值法的4组残差晕染图

根据克里金插值法和径向基函数法2种插值方法下4组数据生成的DEM，取断裂线附近检核点的（x，y）坐标和其残差值，分别生成4组残差晕染图[8-10]，在生成的残差晕染图上导入断裂线的dxf数据，可以清晰看出残差值大小分布范围。其中克里金插值法的4组残差晕染图如图6所示，径向基函数法的4组残差晕染图如图7所示。



A组　　B组　　C组　　D组

图7　径向基函数法的4组残差晕染图

将残差进行统计分析，可以分别得到如下4组数据的残差值统计表（表2）。通过表2可知，克里金插值法和径向基函数法中A组的残差图中残差值在断裂线附近较大，0.5~1 m的占比26%，大于1 m的占比18.5%，显然A组中的内插高程偏差很大。而B组中0.5~1 m的占比15.2%，大于1 m的占比11.6%，可以看出虽然B组中稍强于A组，但是仍达不到精度要求。与C组相比，可以明显看出B组中约束线段上取点不足，需要增加点数才能提高DEM精度，这种方法的主要问题在于如何恰当地确定特征线上加密点之间的距离。综合对比克里金插值法下的C、D组和径向

表2 不同方法的残差值统计表

范围/m	克里金插值法				径向基函数法			
	A组	B组	C组	D组	A组	B组	C组	D组
0.1以下	57	103	130	187	58	106	129	190
0.1~0.2	33	35	71	50	32	36	74	49
0.2~0.3	25	20	56	17	30	18	52	20
0.3~0.4	19	20	18	20	16	25	20	15
0.4~0.5	19	23	1	2	18	19	1	2
0.5~1	72	42	0	0	72	40	0	0
1以上	51	33	0	0	50	32	0	0

基函数法下的C、D组，可以看出，残差最多集中在0.1 m以下，但都未大于0.5 m，绝大部分都是在0.3 m以下，占比超90%，说明C、D组重建DEM效果较好。

基于虚拟断裂线法重建DEM由于只需要导入点而不需要软件支持断裂线功能，所以更加适用于商用DEM插值软件（如Global Mapper），便于推广。我们用虚拟断裂线法在Global Mapper中（三角网法）生成的DEM，经分析，断裂线附近最大残差值为0.681 m，断裂线附近的中误差为0.148 m，符合相关规范的精度要求。

为了更直观地分析BLN文件格式的断裂线在克里金插值法和径向基函数法中的作用，本文选取断裂线附近的11个点，通过这11个点的残差值计算得到均误差和中误差，如表3所示。

其中点1~4为断裂线区域外的数据，点5~11为断裂线附近的数据。通过上表可以看出，加入BLN断裂线数据前，克里金插值法和径向基函数法的A组的均误差和中误差明显大于D组的相应值。克里金插值法和径向基函数法在加入断裂线后，两者生成的DEM中误差分别为0.152、0.127 m，表明2种方法均适用于DEM重建。

3 结 语

本文针对突变地形的形态特征，提出了一种融入地形的拓扑断裂线的DEM高保真方法，该方法基于法向量来提取断裂线，利用断裂线上少量关键点生成断裂线文件，通过克里金插值法和径向基函数法生成DEM。实验得出，在点云数据密度不足的情况下，该方法显著地提高了点云缺失处的DEM精度，更加真实

表3 加入BLN断裂线数据前后残差值比较/m

点号	克里金插值法		径向基函数法	
	A组	D组	A组	D组
1	0.244	0.050	0.225	0.077
2	0.027	0.027	0.018	0.018
3	0.039	0.010	0.041	0.016
4	0.010	0.010	0.007	0.007
5	0.989	0.120	0.988	0.069
6	1.079	0.009	1.071	0.066
7	0.983	0.167	0.986	0.120
8	1.129	0.285	1.105	0.254
9	0.534	0.011	0.554	0.024
10	0.819	0.323	0.791	0.272
11	1.201	0.155	1.203	0.092
均误差	0.641	0.106	0.424	0.067
中误差	0.789	0.152	0.783	0.127

地反映出了突变地形的形态特征，对于三维激光点云生成DEM有一定参考价值。

参考文献

[1] 高原,朱娅男,陈传法,等. 高精度DEM建模的加权径向基函数插值方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(8):1 373-1 379

[2] 王婷婷. 断裂线辅助机载LiDAR生产DEM的应用探讨[J]. 资源信息与工程,2022,37(2):66-69

[3] 周波,徐俊波. 地形特征约束下的失真DEM修复方法[J]. 测绘通报,2017(8):56-61

[4] 彭检贵,邢元军,宋亚斌,等. 一种顾及地形特征的山区LiDAR高精度DEM提取算法[J]. 软件导刊,2017(10):27-30

[5] 徐景中,万幼川,张圣望. 基于机载激光雷达点云的断裂线自动提取方法[J]. 计算机应用,2008(5):1 214-1 216

[6] 李莉,胡建平. 克里金插值算法在等高线绘制中的应用[J]. 天津城市建设学院学报,2008(1):68-71

[7] 和娴,董有福,王玉成. 径向基核函数在DEM内插中的适用性分析[J]. 测绘科学,2017(2):5-10

[8] 李强,石德强,徐璇,等. MapGIS、Section与Surfer软件在处理氡等值线图中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(2):137-139

[9] 黄登,于海波,袁晓玲,等. 利用Surfer建立航道DEM适应性的研究[J]. 中国水运(航道科技),2018(2):57-60

[10] 刘权. 基于Surfer的芦潮港水闸附近河床变形分析[J]. 现代测绘,2023(3):15-19