



基于多波束仰扫的内河船舶吃水检测技术*

陈德山¹, 朱剑华², 李吉祥¹, 陈先桥³

(1. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
2. 长江武汉航道局, 湖北 武汉 430011; 3. 武汉理工大学 计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为防止内河船舶超吃水航行, 需对船舶吃水主动进行实时动态检测, 提出一种基于多波束声纳测深系统的内河船舶吃水检测系统。以声纳测距技术为基础, 设计内河船舶吃水检测系统方案, 完成检测系统软件架构设计与多波束声纳测深系统通信协议, 采用多波束声纳测深数据滤波去噪算法滤除异常数据, 系统实现了船舶吃水轮廓的清晰准确成像, 并能数字化、实时显示船舶吃水深度, 对于内河船舶吃水监管控制有一定可行性。

关键词: 多波束; 船舶吃水; 动态检测; 滤波去噪

中图分类号: U 115

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)01-0152-06

Inland ship draft detection based on multi-beam echo sounder in pitch-up setting

CHEN De-shan¹, ZHU Jian-hua², LI Ji-xiang¹, CHEN Xian-qiao³

(1. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Changjiang Wuhan Waterway Bureau, Wuhan 430011, China;
3. School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: To prevent the inland river navigation ships exceed the specified draft limits, a real-time active detection of dynamic ship draft is necessary. We propose an inland river ships draft detection system based on multi-beam echo sounder. Based on sonar ranging technology, and design the framework of detection system, the software architecture and the communication protocols of multi-beam echo sounder system. Data filtering is adopted to remove abnormal data. As a result, the system displays clear and accurate ship draft outlines, real-time ship draft. The feasibility for inland river ships draft monitor and control is verified.

Keywords: multi-beam echo sounder; ship draft; dynamic detection; data de-noising

我国水资源丰富, 航运业得益于优良的自然条件发展迅速, 船舶朝着大型化发展, 船舶载质量与吃水深度不断加大, 对航道要求越来越高^[1]。部分船舶为片面追求运输效率, 无视航道水深对船舶吃水的限制, 超过规定的装载吃水航行, 不仅给船舶自身安全带来威胁, 还严重破坏航道, 阻碍航道运输, 增加航道维护成本, 危害极其严重^[2]。

防止船舶超吃水航行的有效方法是监管部门对航行船舶吃水主动进行实时动态检测。目前, 国内外船舶吃水检测方法主要分人工检测与自动检测两种。人工观测即通过人眼观察直接读取船体水尺刻度值。此方法检测效率低下, 观测效果受到天气影响较大, 且吃水线和水尺存在被伪造的风险。近年来, 船舶吃水自动检测受到越来越多的关注。总体上, 自动检测方法主要有: 压力

收稿日期: 2015-10-18

***基金项目:** 交通运输部信息化技术研究项目 (2013364548200); 交通运输部应用基础研究项目 (2013329811220);
湖北省自然科学基金创新群体项目 (2013CFA007); 武汉理工大学自主创新研究基金 (2015IVA060)

作者简介: 陈德山 (1986—), 男, 博士, 助理研究员, 从事水下探测与成像、计算机视觉研究。

传感器法^[3]、基于图像处理技术的水尺标记识别^[4]、激光测量法^[5]、电子水尺^[6]。基于压力传感器和电子水尺的自动检测方法均需要将传感器安装在被测船舶船体外侧,难以用于监管部门离船检测任务,且传感器工作环境较为恶劣,容易导致传感器损坏;基于图像处理技术的水尺标记识别方法利用相机代替人眼,但是难以克服水尺被恶意改造、不良天气条件影响测量效果的缺点;激光在水中传输衰减较大,且传输距离受水质影响,通常在浑浊水体条件下检测距离难以满足需求。此外,部分船主在船舶龙骨板底部加装护底板,如不实现船舶底部的检测,护底板的厚度无法识别,存在检测范围与方式上的盲区;从安全监管角度,为了防止船舶超吃水航行,必须实现离船远隔式、高精度的船舶吃水自动检测与判断。

本文提出方法为一种基于多波束仰扫的船舶吃水检测新方法。多波束声纳是水下非接触式测量的重要工具,能有效适应不同水深、水质及环境温度等水下探测的需求,被广泛应用于诸不同的水下测量任务^[7-8]。采用多波束声纳仰扫的方式,当船舶经过声纳所处位置上方,即检测区域,多波束声纳将实现船底外轮廓的直接扫描,通过分析计算回波信息,对异常数据滤波去噪,测算出船舶吃水深度。该方法能够快速、主动、精确地测出船舶吃水,具有较好的实际应用意义。

1 检测系统

系统硬件布置见图1。具体布置方式为:将铝合金桁架1沿着大型试验船垂直置于水中,水上部分固定于大型试验船船舷。铝合金桁架2与桁架1通过转轴相连,成90°夹角,多波束测深仪固定在铝合金桁架2顶端,多波束声纳的检测方式为向上仰扫。多波束测深仪通过电缆以串口通信的方式将声纳数据传输至试验船上的声纳数据中心,声纳数据中心通过网口通信方式传输数据至船舶吃水检测系统软件。通过缆绳的收放来控制铝合金桁架1的放置姿态。

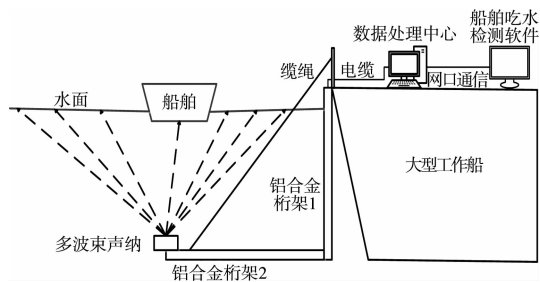


图1 系统原理

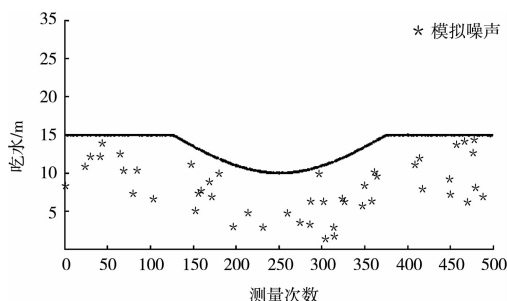
2 深度数据滤波

由于水下环境复杂,多波束声纳测深数据会受到多种外界因素的干扰。从多波束声纳测量原理与测量环境分析,异常数据的来源主要有:水下环境影响,包括水质、进入监测区域的鱼类等生物;船舶航行影响,船舶吃水较深、船舶底部各多波束声纳距离较近,船舶航行和船舶螺旋桨造成的水流水泡波动。针对这些原因所造成的数据异常,将船舶吃水数据的异常主要分为两种:

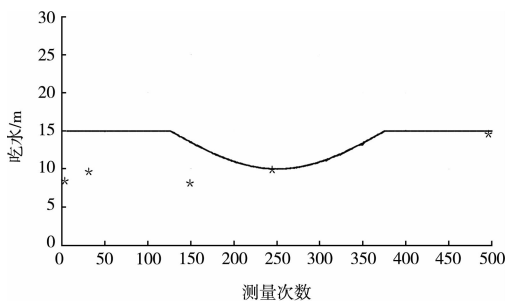
1) 离散跳跃异常。数值异常跳跃,即远偏离于正常值,数据分布比较离散、不连续,可能出现于声纳扫测范围的任何位置,这类数据异常主要是由水下环境中的杂质引起的。

2) 连续跳跃异常。此类异常主要造成因素是船舶航行或螺旋桨运动造成的水流水泡波动,这类数据数值波动较缓、分布则较连续。由于成因之一为螺旋桨,所以这类数据容易出现在船舶尾部。

对于离散异常数据,通过模拟船舶吃水轮廓与离散跳跃数据,对其使用中值滤波算法,模拟过程分为3步:采用水平直线和正弦函数曲线分别模拟水面和船舶吃水轮廓;加入均匀分布的随机数模拟噪声;中值滤波并输出滤波图像(图2)。



a) 加入模拟噪声后的船舶吃水轮廓模拟



b) 经中值滤波后船舶吃水轮廓模拟

图2 中值滤波剔除离散跳跃异常数据的效果

从中值滤波算法的模拟结果可以看出,中值滤波对船舶吃水成像中产生的随机噪声过滤效果良好。

连续跳跃异常数据的特征为集中且连续,一般分布在船尾,则中值滤波等针对随机噪声的算法并不适用。针对其特征,需根据正常数据拟合曲线并对异常数据集中区域进行预测。由于每一帧声纳检测数据为单次对船舶底部进行横向测量的结果,若当前探测范围为船舶尾部,则当前帧的检测数据全部为异常数据,无正常数据进行拟合与预测。因此该类数据滤波方法调整为对当前船舶吃水检测全过程的吃水深度数据进行拟合与预测。可利用最小二乘法进行回归预测方法进行这类异常数据的处理。

根据船舶纵截面船舶吃水数据坐标,横坐标为多波束测深声纳检测一条船舶时的检测次数 x ,纵坐标表示该次检测的最大吃水数据 $f(x)$ 。取一段测量的数据集合 $(x_1, f_1), (x_2, f_2), \dots, (x_n, f_n)$, n 表示测量的总次数,根据数据集合则可求得本次数据的拟合曲线为:

$$\hat{f}(X) = ax + b \quad (1)$$

设点 x_i 处拟合曲线值与真实值的误差为:

$$\Delta\sigma = f_i - ax_i - b \quad (2)$$

根据最小二乘法求线性回归函数的估计 $\hat{y} = a + bx$ 就是求使式(3)取最小值时 a 、 b 的值:

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n [f_i - (a + bx_i)]^2 \quad (3)$$

这样的 a 、 b 分别记为 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 。根据二元函数求极值的充分条件可知, $Q(a, b)$ 的最小值存在,将 $Q(a, b)$ 分别对 a 、 b 求一阶偏导数并令其为0,得到如下方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (f_i - a - bx_i) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (f_i - a - bx_i)x_i = 0 \quad (5)$$

得到关于 a 、 b 的线性方程组:

$$\begin{cases} na + n\bar{x}b = n\bar{f} \\ n\bar{x}a + (\sum_{i=1}^n x_i^2)b = \sum_{i=1}^n x_i f_i \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$, 由于 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是不完全相等的 n 个常数,可知方程组的系数行列式等式为 $n(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2) = n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \neq 0$,故方程组有唯一解能够使得 $Q(a, b)$ 取得最小值,从而有

$$\begin{cases} \hat{a} = \bar{f} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})f_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (7)$$

通过前几个数据预测出线性回归方程,通过线性回归方程得出下一个数据值 $\hat{D}_i$,判断预测得到的数据与检测得到的原始数据之差 $\Delta d = |\hat{D}_i - f_i|$ 。若 Δd 大于阈值 h ,则可以判断检测得到的数据为异常数据,使用预测得到的数据将其替换。若 Δd 小于阈值 h ,则保留原始检测数据。其中,阈值 h 可通过计算所有进行预测的点值的标准差得到:

$$h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

通过对模拟的全过程船舶吃水数值坐标进行最小二乘法拟合预测,异常数据处理结果见图3。从图3可知,通过最小二乘法进行拟合能有效识别连续异常数据,且对正常数据段影响较小。

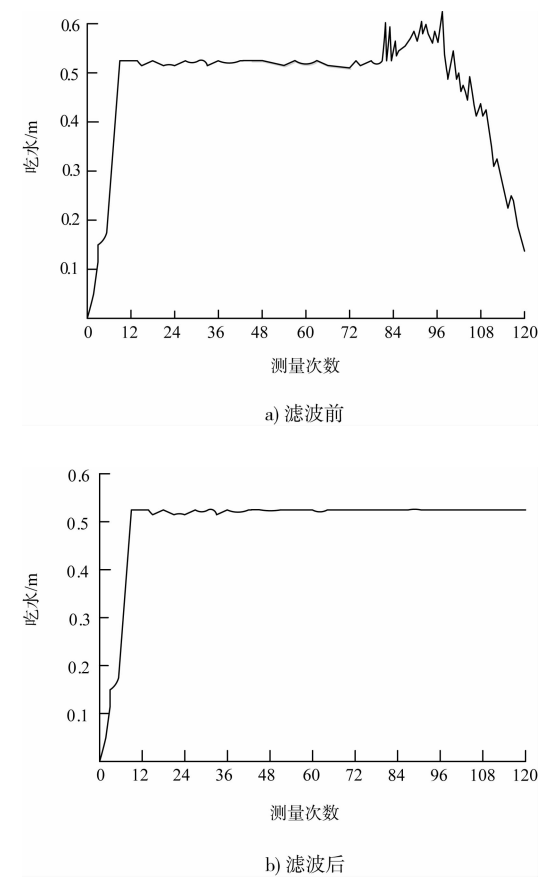


图 3 连续异常数据滤波算法处理对比

3 吃水值计算

声纳原始数据处理计算利用多波束声纳测深数据, 则可以水面为 x 轴, 多波束测深声纳至水面的垂线为 y 轴建立平面直角坐标系。多波束声纳每一条波束抵达船舶底部或其他物体反射回换能器后, 其每个反射点可以通过声纳测深数据计算出其坐标, 计算原理见图 4。

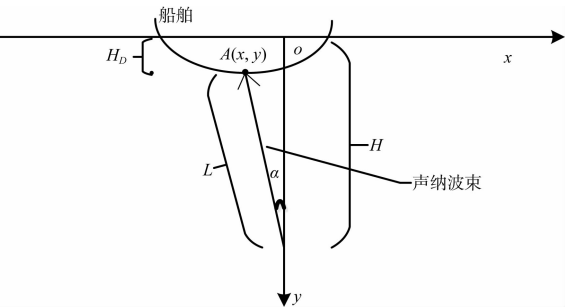


图 4 利用多波束声纳测深数据计算船舶吃水原理

以 A 点为例, 其坐标计算公式为:

$$\begin{cases} x = L\sin\alpha \\ y = H - L\cos\alpha \end{cases}$$

(9)

其中波束与 y 轴夹角 α 、波束射程 L 由报文数据解析得到, 多波束声纳所处水深 H 由水深传感器获得。 A 点坐标确定后, 则 A 点处船舶吃水值即为其纵坐标 y 。通过计算当前帧每一个反射点的坐标, 则可在坐标系上将反射点一一标出。由于多波束声纳的波束信号十分密集, 一次探测可获得数百个点的信息, 通过描点可实现多波束声纳当前帧的检测图像显示。船舶吃水轮廓的所有反射点的纵坐标的最大值为当前帧所检测船舶的吃水深度。

$$H_D = \max(Y)$$

(10)

通过不断对当前帧的声纳测深数据计算所得的反射点进行滤波与位置标绘, 实现船舶吃水轮廓的实时动态显示。与计算一帧船舶吃水数据内船舶吃水深度值类似, 将每一帧吃水数据所求得的船舶吃水深度放入集合 H 中, 等到当前被检测船舶驶离多波束声纳检测区域, 集合 H 中则有若干个船舶吃水深度值, 将集合 H 中所有数值进行连续异常数据滤波处理后, 根据船舶吃水检测原理, 滤波后集合中最大值即为当前被检测船舶的吃水检测最终结果。

4 试验结果

本试验采用 Reson SeaBat 7k 多波束声纳。尽管多波束测量系统具有配套软件, 但是该软件没有吃水检测的相关功能。采用 VC++ 6.0 开发环境进行系统软件的开发, 利用 MFC 图形编程方法设计软件界面并完成数据通信、数据保存和吃水检测等功能的软件实现^[9-10]。系统主界面见图 5。



图 5 船舶吃水检测系统软件界面

试验地点选择在浙江省杭州市建德市新安江大坝上游的试验场。将船舶吃水检测系统软件与声纳数据中心建立通信连接，当船舶驶入多波束测深仪探测区域时，检验软件运行效果。

首先检测吃水约为 25 cm 的小型船吃水数值，然后将通过缆绳系在船上的铁桶置于 2 m 深的水中，检验系统软件对异物的分析能力与异常数据剔除效果，测试结果见图 6、7。

从试验结果对照可看出，船舶吃水检测系统软件能够实时、数字化地显示声纳扫描图像与船舶吃水数值，并且对于异常数据的剔除有较为有效的处理结果。

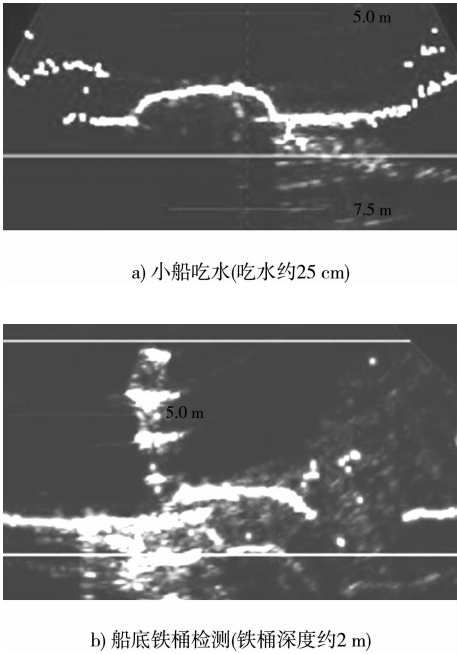


图 6 声纳数据中心检测中心界面

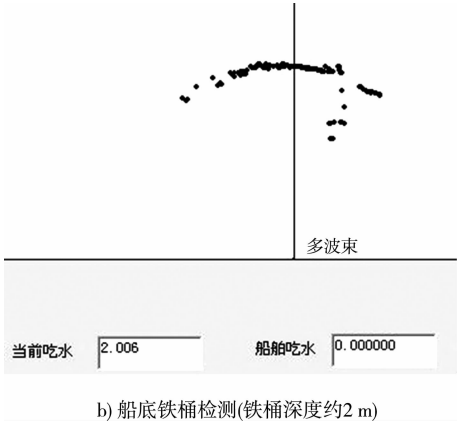
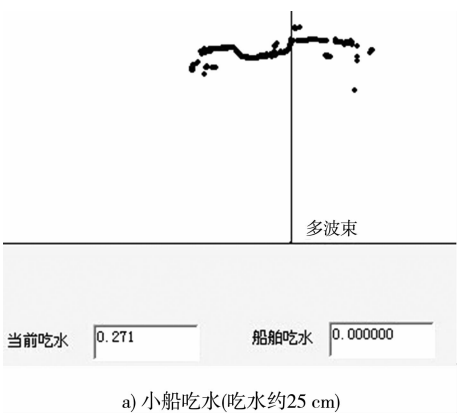


图 7 吃水检测系统软件界面

将船舶吃水检测系统软件吃水检测值与船舶吃水目测值进行对比，从而计算并分析误差(表 1)。

表 1 吃水检测结果

类型	次数	检测吃水深度/m	实际吃水深度/m	误差 ΔD/m
小型船舶	1	0.244	0.25	-0.06
	2	0.256		0.06
	3	0.243		-0.07
	4	0.251		0.01
	5	0.252		0.02
	6	0.251		0.01
	7	0.247		-0.03
	8	0.255		0.05
	9	0.252		0.02
	10	0.248		-0.02
船下异物检测 (以铁桶置于 船舶下方 2 m 深水域中模拟)	1	2.02	2.00	-0.02
	2	2.03		-0.03
	3	2.00		-0.00
	4	2.07		-0.07
	5	2.10		0.10
	6	2.08		-0.08
	7	2.03		-0.03
	8	2.11		0.11
	9	2.03		-0.03
	10	2.10		0.10

造成误差的原因主要有：船舶实际吃水值为目测值，受到水面波浪等影响，检测时实际吃水可能与目测值有所偏差；多波束声纳测深数据受到异常因素的干扰，系统软件所采用的异常数据滤波算法没有将所有异常数据完全剔除，从而影响最终船舶吃水数据的计算。

5 结语

1) 试验表明本文方法能够实现较好的数据滤波,测得的吃水深度值与真实吃水值比较接近。然而,水下环境较为复杂,数据易受到严重干扰,因而研究更稳健的滤波算法具有重要意义。

2) 多波束“仰扫”的装配方法原理简单,既为吃水深度值计算方法带来便利,同时又具有一定的工程实现的便利性。当然,工程化实施还需要考虑长期使用过程中换能器的清理问题和设备的持续供电等问题。

参考文献:

[1] 国务院. 国务院关于加强长江等内河水运发展的意见[J]. 中国水运, 2011(2): 6-7.

[2] 童飞, 曾文. “超吃水”航行管理问题研究[J]. 中国水运, 2008(7): 32-33.

[3] 孙国元, 毛奇凰. 自动检测船舶吃水和稳性参数的方法探讨[J]. 中国航海, 2002(2): 30-32.

[4] Ran X, Shi C, Chen J, et al. Draft Line Detection Based on

Image Processing for Ship Draft Survey [C] //Gao L. Proceedings of the 2011 2nd International Congress on Computer Applications and Computational Science. German: Springer, 2012: 39-44.

[5] 毕方全, 梁山. 船舶“超吃水”航行动态检测方法研究[J]. 中国水运, 2011(7): 1-3.

[6] 孙国元, 徐扬. 船舶电子水尺及其应用[C] //中国航海学会通信导航年会学术论文集. 北京: 中国航海学会通信导航专业委员会, 1992: 86-90.

[7] 罗宁. 内河船舶吃水自动检测装置研究及应用前景[J]. 中国水运, 2012(2): 86-88.

[8] 沈彤茜. 多波束系统交互式数据处理软件设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

[9] 朱晓龙. 基于多波束测深技术的长江航道测量研究[J]. 科技创新导报, 2013(12): 52-53.

[10] Donahoo M J, Calvert K L. TCP/IP sockets in C: practical guide for programmers[M]. German: Morgan Kaufmann, 2006.

[11] 张伟. 多波束测深系统在水下地形测量中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 138 页)

3) 模型试验表明, 3 m 整治水位在整治效果上存在一定的局限性, 枯水流量时约束力过大, 主航槽弯道部位流速偏大, 后退坝头位置后受滩段河势影响又难以保证整治效果, 因此枯水束水虽强但整治线不宜后退。优化过程中又针对 2.5 m 坝头高程开展试验, 结果表明虽可达到枯水整治效果, 但在中水时控制力稍弱, 航槽左缘存在局部少量淤积体。

4) 经过模型 2.0、2.5、2.8 m 多方案比选试验, 采用坝头 2.5 m 和坝中 3 m 两级高程布置倒钩磙丁顺坝为阶梯状, 可满足不同流量下水流归槽时间, 增加消落期冲刷力度, 同时可避免航槽局部淤积和流速过大, 达到了较好的整治效果和合理的上滩指标。两级坝面还有利于减少坝头及背水坡绕流强度及冲刷坑深度, 可有效降低整治

建筑物后期维护工程量和维护费用。

参考文献:

[1] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

[2] 钟亮, 许光祥, 周鑫靖. 长江上游胡家滩航道整治数值模拟研究[J]. 水运工程, 2015(5): 153-160.

[3] 钟亮, 许光祥. 长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程工可阶段数学模型研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2014.

[4] 许光祥, 彭凯. 长江上游九龙坡至朝天门河段航道建设工程工可阶段模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.

[5] 丁晶晶, 陆彦, 陆永军. 台阶式丁坝水动力特性及防冲效应[J]. 水利水电工程学报, 2014(5): 67-73.

(本文编辑 郭雪珍)