

H-ADCP 回归方程拟合及应用系统的研究

张红卫¹, 惠建新², 张永兵³, 陈志峰¹, 郑宏¹, 王伟¹

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012;

2. 中国科学院紫金山天文台, 江苏 南京 210008;

3. 江苏南水信息科技有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要:文中以 H-ADCP 测流技术以及最小二乘法为基础,提出了在一定水位及指标流速范围下的回归方程拟合系统的系统结构。结合 H-ADCP 的特点及实际需求,以及 .NET 开发环境设计开发了 H-ADCP 回归方程拟合及应用系统。系统根据 H-ADCP 采集的单元流速,通过函数计算得到指标流速。在不同的水位及指标流速范围下利用最小二乘法以及回归方程的计算与分析可以确定,H-ADCP 的指标流速与断面平均流速的一元二次性关系,从而拟合出指标流速与断面平均流速的回归方程。结合相关系数选择合适的回归方程应用于流量的计算,借助指标流速与断面平均流速的相关系数分析进行推求相应的断面流量。系统的建设不仅给实际的断面平均流量的计算提供了有效方法,而且对测流及资料整编等方面提供了重要的技术支持。

关键词:H-ADCP;回归方程;指标流速;断面平均流速

中图分类号:TP302.1

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)09-0194-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.09.041

Research on H-ADCP Regression Equation Fitting and Application System

ZHANG Hong-wei¹, HUI Jian-xin², ZHANG Yong-bing³, CHEN Zhi-feng¹,

ZHENG Hong¹, WANG Wei¹

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Nanjing 210012, China;

2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3. Jiangsu Naiwch Scientific and Technological Information Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract:Based on H-ADCP technology in flow measurement and least square method, propose a system structure of the regression equation system in a certain level and the index of the velocity range. Combined with the characteristics of H-ADCP and the practical needs, and the .NET development environment, H-ADCP regression equation fitting and application system is designed and developed. According to the H-ADCP acquisition unit flow and the function, the system obtains index velocity. It fits regression equation of mean velocity and cross section velocity index. The appropriate regression equation is selected by the correlation coefficient for flow calculation. The system construction not only provides an effective method of calculating system construction to the actual average section flow, but also provides important technical support for the flow measurement and data compilation.

Key words:H-ADCP; regression equation; velocity index; mean velocity profile

0 引言

Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (H-ADCP) 是美国 RD 仪器公司 (RD Instruments, Inc.) 生产,用于河流或明渠流速、流量在线监测的声学多普勒仪器^[1]。H-ADCP 流速测验的声束是水平方向,故称

之为 H-ADCP^[2]。H-ADCP 有一个垂直方向上的声束用来测验水位值。在线流量监测时,H-ADCP 实时地去采集水平线上的流速分布数据和水位数据^[3]。结合单元流速、水位数据及过水断面面积,选择合适的流量算法计算出流量。指标流速法是最为常用的用于计算流量的方法。选择合适的回归方程是计算出准确流

收稿日期:2014-11-05

修回日期:2015-02-06

网络出版时间:2015-08-26

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(重点基金项目)(Y521008)

作者简介:张红卫(1981-),女,工程师,硕士,研究方向为水文信息采集与处理、水情信息系统设计与开发。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150826.1558.060.html>

量的关键。

1 H-ADCP 河流流量测流原理及指标流速

H-ADCP 多普勒频移原理是测量水体流速的,每个换能器既是接收器又是发射器^[4]。其测量原理是:ADCP 向水中发射固定频率的超声波短脉冲,这些超声波脉冲碰到水中的散射体将发生散射,从每个波束接收到的回波信号可得到水流的东向、北向和垂向速度分量^[5],H-ADCP 能够测量仪器所在水层处剖面范围内各个单元的流速^[6],用户将某一水平线段内各个单元内的流速求算术平均,得到该线段内的指标流速,如图 1 所示^[7]。

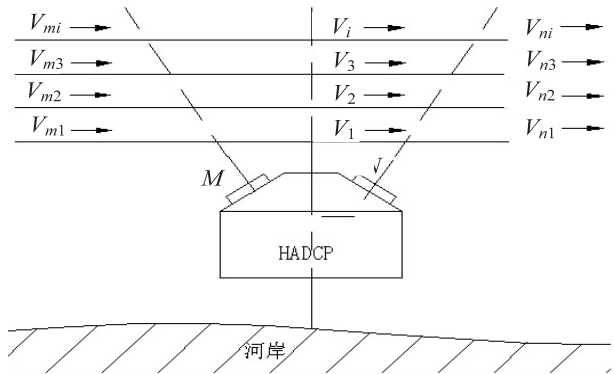


图 1 H-ADCP 测量单元

2 最小二乘法之多项式拟合回归方程

假设给定数据点 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$, φ 为所有次数不超过 $n (n \leq m)$ 的多项式构成的函数类,现求 $p_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \in \varphi$,使得

$$I = \sum_{i=0}^m [p_n(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=0}^m (\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i)^2 = \min \tag{1}$$

当拟合函数为多项式时,称为多项式拟合,满足式(1)的 $p_n(x)$ 称为最小二乘法拟合多项式^[8]。特别地,当 $n = 1$ 时,称为线性拟合或直线拟合。显然 $I = \sum_{i=0}^m (\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i)^2$ 为 a_0, a_1, \dots, a_n 的多元函数,因此上述问题即为求 $I = (a_0, a_1, \dots, a_n)$ 的极值问题。由多元函数求极值的必要条件,得

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=0}^m (\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i) x_i^j = 0, j = 0, 1, \dots, n \tag{2}$$

即

$$\sum_{k=0}^n (\sum_{i=0}^m x_i^{j+k}) a_k = \sum_{i=0}^m x_i^j y_i, j = 0, 1, \dots, n \tag{3}$$

式(3)是关于 a_0, a_1, \dots, a_n 的线性方程组,用矩阵表示为^[9]:

$$\begin{bmatrix} m+1 & \sum_{i=0}^m x_i & \cdots & \sum_{i=0}^m x_i^n \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \cdots & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n & \sum_{i=0}^m x_i^{n+1} & \cdots & \sum_{i=0}^m x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^m y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^m x_i^n y_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(3)或式(4)称为正规方程组或法方程组。

可以证明,方程组(4)的系数矩阵是一个对称正定矩阵,故存在唯一解^[10]。从式(4)中解出 $a_k (k = 0, 1, \dots, n)$,从而可得多项式

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k \tag{5}$$

可以证明,式(5)中的 $p_n(x)$ 满足式(1),即 $p_n(x)$ 为所求的拟合多项式^[11]。

3 H-ADCP 回归方程拟合及应用系统

3.1 系统整体结构

本系统主要对 H-ADCP 采集的单元流速处理及人工现场采样 ADCP 断面平均流速整合,以及对二者建立关系,实现回归方程的建立以及相关的应用。系统构架图如图 2 所示。

其中,回归方程的建立以及相关系数计算是整个系统的核心单元。系统平台采用 .NET 为支撑架构,ORACLE 为数据库。其核心的处理流程如下:

(1)回归方程拟合条件:根据现场的实际情况可以划定水位范围以及指标流速范围拟合回归方程。一般可以将水位划为 3 个范围,指标流速划为 3 个范围。每个水位范围对应着 3 个指标流速的范围,这样就形成 9 个条件,对应着 9 个回归方程。

(2)回归方程的拟合形式、二次项式,对于划定的水位及指标流速范围拟合回归方程,并通过相关系统来显示回归方程在水位及指标流速范围内的合理性。

另外,回归方程拟合及应用系统采用了用户管理权限登陆机制。普通用户对系统只有查看及生成回归方程的权限,不能管理和应用回归方程。超级用户对回归方程系统具有所有的权限。针对实际应用中的复杂性,制定了超级用户人工修改及删除及增加等实用

功能。当发现生成的回归方程与实用中有偏差,超级用户可以在系统中的回归方程管理模块来管理及校验回归方程。

可见,回归方程系统不仅采用权限区别操作系统,

而且通过对回归方程的生成及调整来进行对流量的计算测算,从而估算出一个较为准确的断面平均流速及流量值,极大地降低了人工测算的工作量,减少了人工工作中的冗余性,提高了工作效率以及数据的准确性。

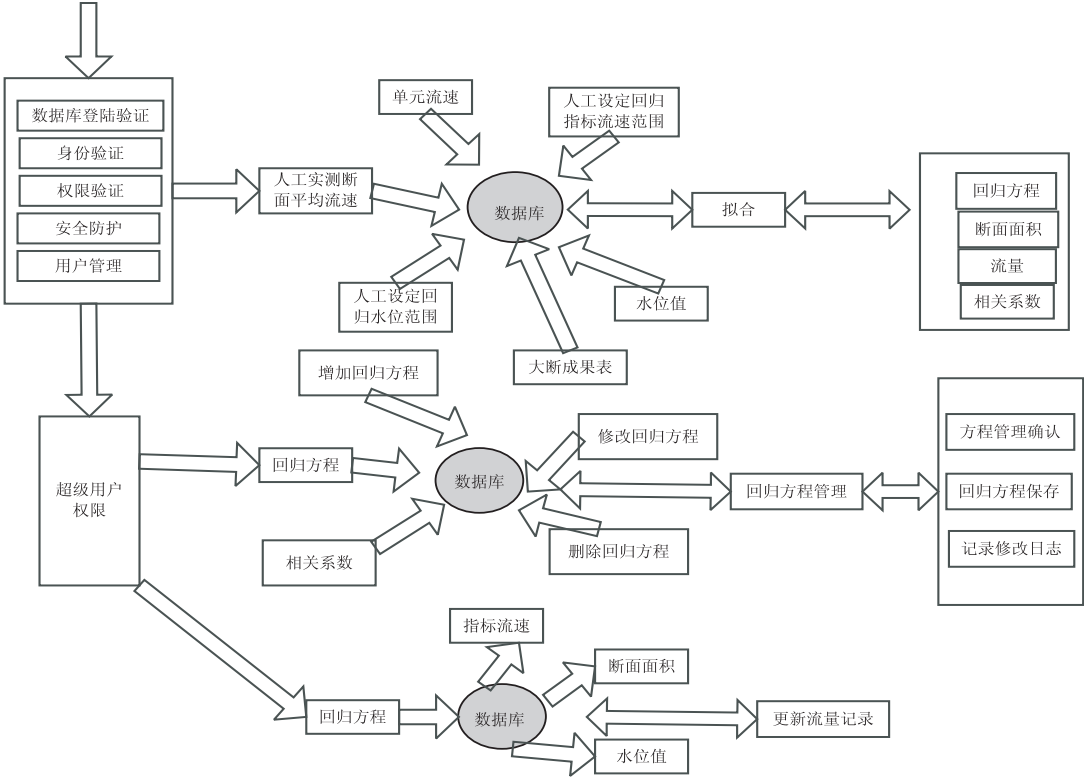


图 2 系统架构图

3.2 系统功能

系统的功能主要分为四个模块:回归方程的建立、

回归方程的管理、回归方程的应用以及用户管理。系统功能图如图 3 所示。

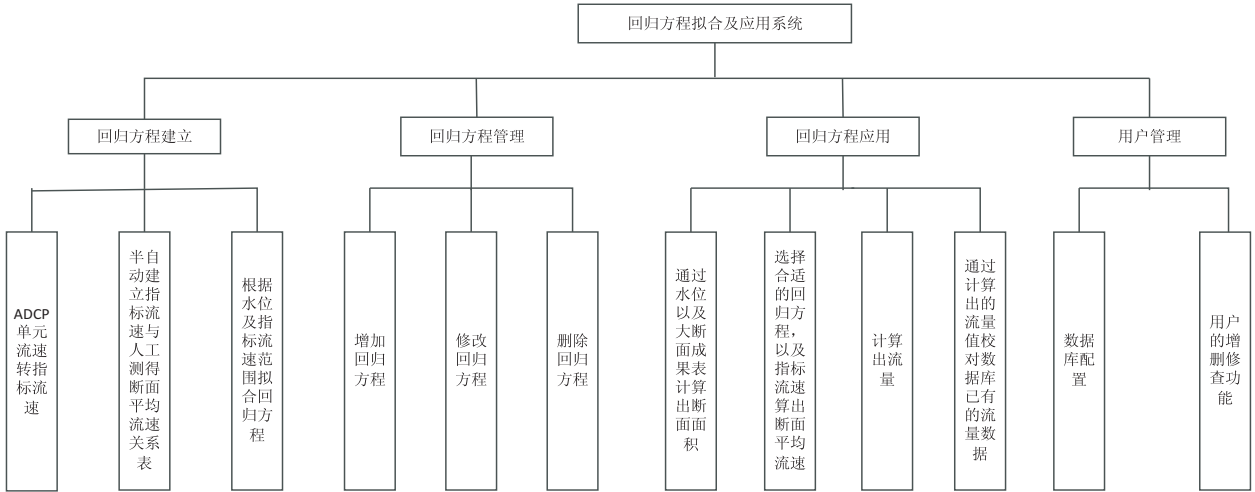


图 3 系统功能图

系统功能的工作流程如下:

(1) 回归方程的建立。

本系统的拟合参数为指标流速、断面平均流速。仪器测得单元流速算术平均后得到指标流速(又称局部流速),与人工实际测流断面的平均流速的关系。指标流速法是一种率定方法。建立率定关系(即流速

回归函数或方程)需要两个步骤。

- 现场流量和指标流速采样。

在现场采用 H-ADCP 进行指标流速采样时,结合人工船测或走航 ADCP 测验断面平均流速数据。在不同的流速或水位情况下进行现场同步采样数据:断面平均流速、指标流速、水位。流量计算的一般公式

为^[12]：

$$Q = Av \tag{6}$$

其中， A 表示断面过水面积(m^2)； v 表示断面平均流速(m/s)。

过水断面面积由断面几何形状和水位确定。假定断面比较稳定，可以认为对于某一断面，过水断面面积仅为水位的函数^[13]：

$$A = f(H) \tag{7}$$

其中， H 为水位(m)。

· 回归分析。

首先选择合适的回归方程，表 1 列出了几种常用的流速回归方程。然后通过对数据进行回归分析(如采用最小二乘法)确定回归系数。值得指出的是，回归方程的选择不是唯一的。通常可以采用几种方程进行回归分析，然后对回归分析结果进行综合评价后确定“最佳”回归方程。本系统采用的是一元二次线程回归方程^[14]。

表 1 几种常用的流速回归方程

回归方程名称	函数关系
一元线性	$V = b_1 + b_2 V_1$
一元二次	$V = b_1 + b_2 V_1 + b_3 V_1^2$
幂函数	$V = b_1 V_1^{b_2}$
复合线性	$V = b_1 + b_2 V_1 \quad V_1 \leq V_c$
	$V = b_3 + b_4 V_1 \quad V_1 \geq V_c$
二元线性	$V = b_1 + (b_2 + b_3 H) V_1$

注：表中 b_1, b_2, b_3, b_4 为回归系数

本系统采用最小二乘法之多项式拟合来建立一元二次多项式。半自动建立好指标流速与断面平均流速之间的关系以及确定好水位及指标流速的拟合范围后，以最小二乘法为基础的算法拟合出回归方程。

(2) 回归方程的管理。

回归方程的管理是超级用户的权限。包括常见的增删修查。本系统中，对回归方程的增删修查中核心问题是对回归条件的管理。在管理的过程中，对水位范围及指标流速的范围的管理策略不同。一个水位范围的条件对应着多个指标流速范围。增加回归方程得考虑系统中是否存在所需的水位及指标流速的范围条件，如果不存在，首先得添加条件范围。修改回归方程时，只能修改方程，对于条件范围不可以修改，这就保证了其他回归方程不能误改，从一定程度上提高了系统操作中的安全性。

(3) 回归方程的应用。

回归方程的计算，旨在结合水位、面积计算出相应的流速及流量。通过水位及大断面成果表可以计算出断面面积。通过单元流速及单元数计算出指标流速。

结合指标流速及相应的回归方程得到断面平均流速，从而断面计算出流量，可以更新数据库中断面面积、断面平均流速以及流量。相关算法将在 3.3 节给出。

(4) 用户管理。

支持用户的添加、权限设置、用户删除、修改账户信息等功能。用户账号密码保护，对非该系统用户进行严格隔离。超级用户具有本系统的全部功能的权限。普通用户没有对回归方程的管理功能。

3.3 系统实现

H-ADCP 回归方程拟合及应用系统，为回归方程的率定提供了更为高效的途径。系统基于 Visual Studio 2012 的开发环境，采用 C#语言编制。经多次测试使用，该系统较为稳定，操作方便^[15]。系统实现的部分伪代码如下：

```
public void ZBLS( DataTable dt,int n );//计算指标流速
private void ImPortDMV( );//导入人工测得的断面平均流速
public void getNHCS( DataTable dt,out double a2, out double
a1, out double a0, out double xgxs)//拟合计算
{
    if ( StationCollection.Count>0)//如果包含测站信息
    {
        getZandVRRange( );//获取参与计算的水位与 ADCP 流量范围条件
        .....
        ComputXS( );//计算拟合方程的三个系数
        .....
        if( isContain)
        {
            //数据库包含该拟合条件下的回归方程,更新数据库
        }
        else
        {
            //数据库不包含该拟合条件下的回归方程,入库
        }
    }
    else//如果不包含测站信息
    {
        .....
    }
}
```

系统界面如图 4 所示。

4 结束语

文中首先分析了 H-ADCP 的测流原理、指标流速以及最小二乘法多项式拟合回归方程的相关技术，然后结合 H-ADCP 回归方程在实际中的应用，提出了在一定水位指标流量范围下的 H-ADCP 回归方程拟合

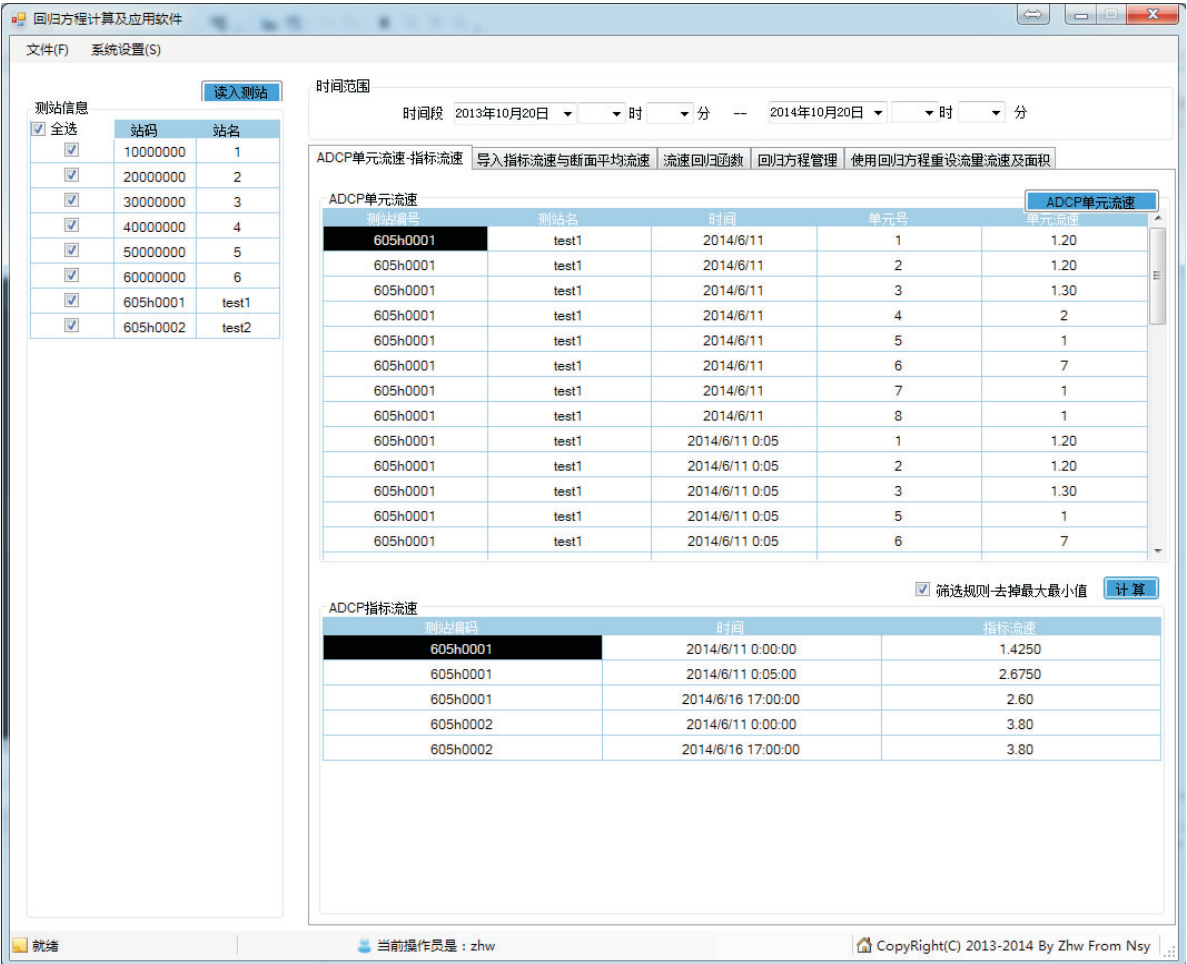


图 4 系统界面

及应用系统的系统整体结构,描述了体系结构各层的功能,最后设计实现了 H-ADCP 回归方程拟合及应用系统。通过该系统的回归方程的拟合以及计算与分析可以确定,H-ADCP 的指标流速与断面平均流速的一元二次线性关系,借助指标流速与断面平均流速的相关系数分析进行推求相应的断面流量。

参考文献:

[1] Huang H. Index-velocity rating development for rapidly changing flows in an irrigation canal using broadband stream pro ADCP and channel master H-ADCP[C]//Proceedings of first international conference on managing rivers in the 21st century: issues and challenges. [s. l.]: [s. n.], 2004: 146-154.

[2] 声学多普勒流量测验规范[S]. 上海: 复旦大学出版社, 2006.

[3] RD Instruments. Acoustic Doppler current profiler, principles of operation a practical primer[M]. America: RD Instruments, 1996.

[4] Joyce T M. On in situ "calibration" of shipboard ADCPS[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6: 169-172.

[5] 田 淳, 刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 郑

州: 黄河水利出版社, 2003.

[6] Trump C L, Marmorino G O. Calibrating a gyrocompass using ADCP and DGPS data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(1): 211-214.

[7] 张华章. 用水平声学多普勒流速剖面仪构建流量自动监测站[J]. 水利水文自动化, 2003(4): 1-6.

[8] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 第 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[9] Morlock S E, Nguyen H T, Ross J H. Feasibility of acoustic Doppler velocity meters for the production of discharge records from U. S. Geological Survey stream flow - gauging stations [R]. U. S. : U. S. Geological Survey, 2002.

[10] 李志敏. H-ADCP 在线测流系统在思贤窖的应用研究[J]. 广东水利水电, 2006(5): 10-11.

[11] 刁新源, 于 非, 葛人峰, 等. 船载 ADCP 测量误差的因素分析和校正方法[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 552-560.

[12] 河流流量测验规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.

[13] 水文资料整编规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[14] 王发君, 黄河宁. H-ADCP 流量在线监测指标流速法定线软件“定线通”介绍与应用[J]. 水文, 2007, 27(4): 63-65.

[15] 赖寿宏. 微型计算机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

H-ADCP回归方程拟合及应用系统的研究

作者：[张红卫](#)，[惠建新](#)，[张永兵](#)，[陈志峰](#)，[郑宏](#)，[王伟](#)，[ZHANG Hong-wei](#)，[HUI Jian-xin](#)，[ZHANG Yong-bing](#)，[CHEN Zhi-feng](#)，[ZHENG Hong](#)，[WANG Wei](#)

作者单位：[张红卫, 陈志峰, 郑宏, 王伟, ZHANG Hong-wei, CHEN Zhi-feng, ZHENG Hong, WANG Wei \(水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京, 210012\)](#)，[惠建新, HUI Jian-xin \(中国科学院 紫金山天文台, 江苏 南京, 210008\)](#)，[张永兵, ZHANG Yong-bing \(江苏南水信息科技有限公司, 江苏 南京, 210012\)](#)

刊名：[计算机技术与发展](#) 

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：[2015 \(9\)](#)

引用本文格式：[张红卫](#). [惠建新](#). [张永兵](#). [陈志峰](#). [郑宏](#). [王伟](#). [ZHANG Hong-wei](#). [HUI Jian-xin](#). [ZHANG Yong-bing](#). [CHEN Zhi-feng](#). [ZHENG Hong](#). [WANG Wei](#) [H-ADCP回归方程拟合及应用系统的研究](#) [期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015 (9)