

ADCP 盲区流速最优推算模型 自适应确定方法研究

陈志高^{1,2} 张红梅³ 赵建虎¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 测绘遥感信息工程国家重点实验室深圳研发中心,深圳市南山区科苑南路,518057)

(3 武汉大学动力与机械学院,武汉市东湖南路 8 号,430072)

摘要:根据 3 种经典垂线流速分布模型,推导出适合 ADCP 盲区流速计算的局部模型,并基于模型内符合精度及其与实际观测垂线流速的相关系数,提出了根据不同时态和流态自适应确定盲区流速模型的思想和方法。实验验证了所推导的盲区流速计算模型的正确性,以及盲区流速最优推算模型自适应确定思想和方法的有效性和可靠性。

关键词:ADCP 盲区;流速模型;垂线剖面;单宽流量
中图分类号:P229.5

ADCP 是当前海域和江河流速测量的主要设备^[1]。受“激振效应”和“旁瓣效应”影响,ADCP 在水层顶部和底部分别会形成上、下盲区^[2]。实际中,盲区流速多采用常数外推法或幂函数法^[3-4],因未顾及天然河道形态、河床糙率、水流特性和含沙浓度等因素,所得流量同实际常存在较大出入。为此,国内外学者在垂线整体流速分布模型方面开展研究^[5-8],并外推出上、下盲区流速计算方法。但盲区流速与其垂线内近邻水层实测流速的相关性要远大于整体,基于整体实测流速所得整体流速模型常不能准确反映盲区实际流速。为此,本文推导了局部盲区流速模型,并在此基础上给出了一种 ADCP 盲区流速最优推算模型的自适应确定方法。

1 ADCP 盲区流速最优模型自适应确定理论和方法

1.1 经典流速分布模型

1) 幂函数模型。基于大量实验,实际流量计算中常采用幂函数流速经验分布模型^[9-10]:

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 \times \left(\frac{z}{z_0}\right)^b \quad (1)$$

式中, z 为河底边界至计算点高度; u 为 z 点流速; $u^* = \sqrt{gz_0J}$ 为河底摩阻流速; z_0 为河底粗糙高度; J 为水面坡降; b 是与河底相对糙率有关的参数,不同水流和边界条件下取值不同。

2) 对数模型。普朗特根据动量传递理论与掺长假说,推导出对数律分布公式^[11]。Ke 等采用卡门-普朗特对数公式描述流速剖面^[12-13]:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

式中, k 为卡门常数,在清水中取 0.4。

3) 抛物线模型。若 u_m 为最大流速, C_0 为待定系数,则抛物线流速分布模型为:

$$\frac{u_m - u}{u^*} = C_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^2 \quad (3)$$

1.2 局部盲区平均流速模型推导

由于盲区流速与垂线内近邻实测流速相关性最强,本文将垂线内整体实测流速分层,提出借助近邻上、下盲区的实测流速数据,分别构建盲区平均流速模型,即局部盲区平均流速模型构建思想。

1) 基于对数的盲区流速模型

式(2)中,若 u^* 、 z_0 和 k 均为常数,设 $A = u^*/k$, $B = -u^* \ln z_0/k$,则有:

$$u = A \times \ln z + B \quad (4)$$

收稿日期:2013-01-23。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41176068, 40976061);深圳市战略性新兴产业发展专项资金资助项目(JCYJ2012083153013429);唐洁科技创新及产业化资助项目(2012CYH05-04)。

对上式在上盲区($H \sim z_2$)积分,可得上盲区平均流速模型:

$$V_T = \frac{A(H \ln H - H) + BH - (A(z_2 \ln z_2 - z_2) + Bz_2)}{H - z_2} \quad (5)$$

式中, H 为 ADCP 实测水深, z_2 为水底至第一个有效单元上边界的高度, $(H - z_2)$ 即为上盲区厚度。类似地,可得下盲区($0 \sim z_1$)平均流速模型:

$$V_B = A(\ln z_1 - 1) + B \quad (6)$$

2) 基于抛物线的盲区流速模型

若 u_m, u^*, z_0 为常量, $A = -C_0 u^* / z_0^2, B = 2C_0 u^* / z_0, C = u_m - C_0 u^*$, 则式(3)简化为:

$$u = Az^2 + Bz + C \quad (7)$$

采用积分推导可得上、下盲区平均流速模型:

$$V_T = \frac{\int_{z_2}^H (Az^2 + Bz + C) dz}{H - z_2} = \frac{AH^3/3 + BH^2/2 + CH - (Az_2^3/3 + Bz_2^2/2 + Cz_2)}{H - z_2}$$

$$V_B = \frac{\int_0^{z_1} (Az^2 + Bz + C) dz}{z_1} = \frac{Az_1^2/3 + Bz_1/2 + C}{z_1} \quad (8)$$

3) 基于幂函数的盲区流速模型

对于固定垂线,若 u^*, z_0 为常数, a 为待求常数,则式(1)可简化为:

$$u = az^b \quad (9)$$

对上式在观测水深层 $z_1 \sim z_2$ 积分:

$$\int_{z_1}^{z_2} az^b dz = a \frac{z_2^{b+1} - z_1^{b+1}}{b+1} \quad (10)$$

令上式与微断面中层实测流速相等,则有:

$$a \frac{z_2^{b+1} - z_1^{b+1}}{b+1} = \frac{(z_2 - z_1)}{n} \sum_{j=1}^n u_j = D_c \sum_{j=1}^n u_j$$

则:

$$a = \frac{D_c^{(b+1)}}{z_2^{b+1} - z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n u_j \quad (11)$$

式中, D_c 为深度单元长度, u_j 为第 j 层水深的实测流速。上盲区和下盲区平均流速 V_T, V_B 为:

$$V_T = \frac{\int_{z_2}^H az^b dz}{H - z_2} = \frac{D_c (H^{b+1} - z_2^{b+1})}{(H - z_2)(z_2^{b+1} - z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_j$$

$$V_B = \frac{\int_0^{z_1} az^b dz}{z_1} = \frac{D_c z_1^{b+1}}{z_1 (z_2^{b+1} - z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_j \quad (12)$$

1.3 盲区最优流速模型的自适应确定

ADCP 实测的垂线内单元流速往上、往下变化趋势基本反映了水表层和底部流速的实际梯度变化,因此,模型与实际各单元流速越吻合,越能够反映流速在垂线内的变化趋势。因此,盲区流速计算模型的可靠性和精度可借助模型与实测流速的相关系数 R 及模型的内符合精度 ϵ 衡量:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})(H_i - \bar{H})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2}} \quad (13)$$

$$\epsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - V_i^0)^2 / (N - 1)} \quad (14)$$

式中, N 为参与拟合的水深单元个数; V_i 为各水深单元的流速拟合值; \bar{V} 为水深单元的平均流速值; H_i 为各水深单元的水深值; \bar{H} 为水深均值; V_i^0 为各水深单元的流速计算值。

基于 R 和 ϵ ,选择最优盲区流速建模方法。其过程如下:

1) 根据垂线内上、下盲区邻近不同深度层单元实测流速,分别构建上述 3 种局部盲区平均流速模型,并分别计算各模型 ϵ 及 R ;

2) 根据如下原则选取最优模型:

$$\epsilon = \min(\{\epsilon_i\}) \cap R = \max(\{R_i\}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

3) 根据 2) 中得到的最优盲区流速模型,计算上、下盲区流速。

河口海岸地区,受海洋潮汐影响,此时的垂线流速分布存在上下盲区流速不一致问题,需对垂线流速进行上、下层划分,分别局部建模。上、下层的分界点可通过计算 ADCP 各层深度单元流速值与其上层流速值之差 Δ_i 的正负号来判断:

$$\Delta_i = V_i - V_{i-1} \quad (16)$$

Δ_i 同号则同层,异号则分层。

2 实验及分析

为验证本文给出的盲区流速推算模型和最优模型的自适应确定方法,2009-03-11 利用 RDI 生产的 300 kHz ADCP 在长江口 NGN-DC 站位开展了 ADCP 流速测量。由于 ADCP 测得的断面各垂线瞬时流速值具有脉动性,首先对流速数据进行时均化,消除紊流脉动及仪器噪声的影响。数据包括 NGN-DC 站位 6 个时段的 6 组时均化流速剖面数据,分别对各组数据采用幂函数法、对数法和抛物线法构建垂线流速模型,根据表 1 相

关系系数及内符合精度,自适应地确定并给出各时段的最优流速分布模型,如图 1 所示。

图 1 中,实心符号为各深度单元实测数据的时均值,空心符号为盲区模型推估值。图 1(a)为落憩时刻的流速分布图,根据表 1 计算的 ϵ 和 R 可以看出,该时段流速分布服从对数流速模型。图 1(b)则是落潮-涨潮转向阶段的流速分布,其上部流速和下部流速出现了分层,自适应模型对上部流速选择抛物线模型,下部选择幂函数模型,根据计算所得 ϵ ,模型与实际相关性很好。图 1(c)为涨憩阶段

流速分布图,服从抛物线流速模型。图 1(d)为涨急阶段流速分布图,符合幂函数分布模型。图 1(e)为涨潮-落潮转向阶段的流速分布,同落潮-涨潮转向阶段一样,上下部流速出现了分层现象,所不同的是,其上部水层从上至下流速逐渐增大,符合抛物线模型;而下部水层流速恰好相反,符合对数模型。图 1(f)为落急时流速剖面图,流速模型选择抛物线模型,与落憩时刻模型存在不一致。

从以上 NGN-DC 站不同时刻流速分布及相关模型参数分析可看出:

表 1 NGN-DC 站位不同时刻流速分布拟合的内符合精度 $\epsilon(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 和相关系数 R 值
Tab. 1 ϵ and R in Different-time Current Velocity Models at NGN-DC Observation Station

流速模型	模型选择参数	a	b		c	d	e		f
			上	下			上	下	
幂函数	ϵ	10.0	2.2	1.2	5.7	2.8	1.1	0.6	2.4
	R	0.96	0.87	0.99	0.99	1.00	0.97	0.97	0.99
对数	ϵ	1.7	1.7	7.1	13.8	9.3	1.5	0.2	2.6
	R	0.99	0.92	0.81	0.90	0.96	0.95	0.99	0.98
抛物线	ϵ	1.7	1.1	4.8	5.5	3.0	0.9	0.2	2.1
	R	0.99	0.97	0.99	0.99	1.00	0.97	0.99	0.99

1) 涨急、涨憩、落急、落憩以及涨落的转向阶段,其流速分布模型各异;

2) 在涨落潮的转向阶段出现分层现象。

对于现象 1),自适应方法根据 3 种模型分别对流速剖面进行拟合,根据最佳关系系数及内符合精度自适应选择最优模型并计算出盲区流速;对于现象 2),上、下部水层流速分布各异,选择单一流速模型势必出现较大误差,而自适应模型则对各层分别建立最佳局部流速模型,有效地解决了垂线剖面流速非单调变化的情况。

盲区估算的整体模型法(方法 I);另一种为本文采用的利用近邻水层的实测流速构建盲区的局部模型法(方法 II)。从表 2 可以看出,根据局部模型法确定的盲区流速的准确性较整体模型法要好,特别是对于垂线 b 和 e 出现流速分层的情况下,局部模型的计算精度要远优于整体模型。

表 2 两种模型构建方法的外符合精度比较/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
Tab. 2 Outside Fitting Accuracy in Different Models at NGN-DC Observation Station($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

	方法	a	b	c	d	e	f
上盲区	I	4.0	4.5	3.7	2.1	4.8	6.0
	II	3.1	0.47	3.6	-1.9	1.4	3.0
下盲区	I	-1.9	14.5	3.3	5.2	-10.3	7.7
	II	-1.2	1.8	1.6	0.4	-1.3	4.3

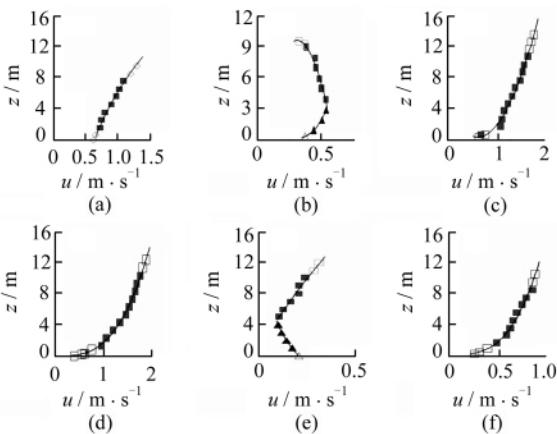


图 1 NGN-DC 站位不同时刻流速分布剖面
Fig. 1 Different-time Current Velocity Profiles at NGN-DC Observation Station

为检验自适应方法的准确性及可靠性,对盲区流速模型进行外符合精度的评定。一种是常规

利用垂线流速剖面上各水层的流速,可以计算该垂线的单宽流量。一种方法是使用较多常数的外推法得到盲区流速(方法 I);另一种则利用自适应确定的流速模型计算上、下盲区流速(方法 II),见表 3。统计分析表 3 可知:1) 方法 II 计算所得上盲区流量比方法 I 大 2%~26%;2) 方法 II 计算所得下盲区流量比方法 I 小 2%~6%;3) 对于单宽流量(总流量),方法 I 比方法 II 大 1%~8%。

对于结论 1),由于除垂线 b 外自适应模型在上盲区范围内皆为增函数,所以方法 II 计算出来

表3 GYSN-D 站位不同时刻单宽流量计算的比较

Tab. 3 NGN-DC Observation Station Unit Discharge Calculation Comparison of Different Times

层位	方法	a	b	c	d	e	f
上盲区/ $m^3 \cdot s^{-1}$	I	2.9	0.9	4.6	4.9	0.66	2.68
	II	3.4	1.2	4.8	5.2	0.86	2.73
下盲区/ $m^3 \cdot s^{-1}$	I	1.2	0.5	0.5	1.3	0.19	0.83
	II	1.1	0.4	0.5	1.2	0.18	0.78
单宽流量 $Q/m^3 \cdot s^{-1}$	I	9.6	5.8	18.61	19.49	2.23	9.09
	II	10.05	5.9	18.84	19.70	2.42	9.09
相对 误差	$(Q_{II} - Q_I) / Q_I \times 100\%$	4.3	-2.4	1.3	1.1	8.5	0.0

的上盲区流量比方法 I 中的常数外推法数值大, 与实际情况符合。对于结论 2), 由于处于落潮-涨潮或涨潮-落潮的转向阶段, 剖面的上下部出现分层现象, 因而模型函数并不是单调函数, 所以利用方法 I 计算所得下盲区流量在落潮-涨潮的转向阶段比利用方法 II 要大, 而在涨潮-落潮的转向阶段计算的流量值则小。但总体而言, 由于利用常数外推法计算底部盲区流量时忽略了河底摩擦对底部水流速度的影响, 导致底部盲区的计算流量偏大。对于结论 3), 由于上盲区厚度及流速对整条垂线的流量计算影响较大, 因而方法 II 计算所得单宽流量比方法 I 大。

3 结 语

针对传统常数外推盲区流速方法的不足以及垂线流速变化单一性的缺陷, 本文推导了对数、抛物线和幂函数局部盲区流速计算模型。在此基础上, 结合 3 种盲区流速计算模型, 提出了盲区最优流速计算模型的自适应确定方法, 实现了基于垂线流速实际变化的最优盲区流速模型确定和准确的流量计算。实验验证了模型和方法的正确性。

在实际应用中, 考虑流态分布具有局域性, 建议选择一定范围内具有代表性的若干个 ADCP 实测垂线流速数据, 开展上、下盲区最优流速模型的确定工作, 并将确定的最优模型作为该区域流速和流量计算的最优模型。此外, 在最优盲区流速模型选择前, 建议先开展垂线流速分布的单调性分析, 该项工作对于提高盲区模型精度以及流量计算精度具有重要的作用。

参 考 文 献

[1] RDI. WinRiver User's Guide [R]. RD Instru-

ments, San Diego, USA, 2000

- [2] RDI. Acoustic Doppler Current Profiler-Principles of Operation: a Practical Primer[R]. RD Instruments, San Diego, USA, 1996
- [3] González-Castro J A, Ansar M, Kellman O. Comparison of Discharge Estimates from ADCP Transect Data with Estimates from Fixed ADCP Mean Velocity Data [C]. Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference, Colorado, USA, 2002
- [4] SL377-2006. 声学多普勒流量测验规范[S]. 中华人民共和国水利部, 2006
- [5] Song T, Graf W H. Uniform Open-channel Flow over a Rough Bed[J]. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 1994, 12(1): 1-25
- [6] 王殿常, 王兴奎, 李丹勋. 明渠时均流速分布公式对比及影响因素分析[J]. 泥沙研究, 1998, 9(3): 86-90
- [7] Bergstrom D J, Tachie M F, Balachandar R. Application of Power Laws to Low Reynolds Number Boundary Layers on Smooth and Rough Surfaces [J]. Physics of Fluids, 2001, 13(11): 3 277-3 284
- [8] Sarma K, Lakshminarayana P, Rao N. Velocity Distribution in Smooth Rectangular Open Channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(2): 270-279
- [9] 徐正凡. 水力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985
- [10] 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
- [11] 姚仕明, 卢金友, 徐海涛. 黄陵庙水文断面垂线流速分布特性和研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(4): 8-11
- [12] Ke X, Collins M B, Poulos S E. Velocity Structure and Sea Bed Roughness Associated with Intertidal (sand and mud) Flats and Saltmarshes of the Wash [J]. Journal of Coastal Research, 1994, 10(3): 702-715
- [13] Smart G M. Turbulence Velocity Profiles and Boundary Shear in Gravel-bed Rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(2): 106-116

第一作者简介: 陈志高, 博士生, 现主要从事声学多普勒流速测量研究。

E-mail: 531214372@qq.com

Adaptive Determination Method of Optimal Calculation Model of ADCP Dead-zone Flow Velocity

CHEN Zhigao^{1,2} ZHANG Hongmei³ ZHAO Jianhu¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Shenzhen Reserch & Development Centre, Stale Key Laboratory of Information Engineering in Sunveying, Mapping and Remote Sersing, South Keyuan Road, Shenzhen 518057, China)

(3 School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, 8 South Donghu Road, Wuhan 430072, China)

Abstract: According to 3 typical vertical flow distribution calculation models, we deduce the calculation models adaptable to ADCP dead zone flow. On the basis of the relating coefficient between the inner coincidence precision of the models and the actual observed vertical flow, we propose the self-adaptive measure determining the ideology and method to calculate dead zone flow under different tense and flow regime. The experiment verifies the correctness of the given dead zone flow calculation models and self-adaptive optimal model determination ideology and method.

Key words: ADCP dead zone; flow model; vertical profile; unit discharge

About the first author: CHEN Zhigao, Ph.D candidate, majors in acoustic doppler current profiler.

E-mail: 531214372@qq.com

.....
(上接第 728 页)

Ellipsoid Expansion Method Considering Ellipsoid Parallel Misalignment and Its Application to Projection Plane Transformation

WANG Lei¹ GUO Jiming¹ SHEN Lili¹ GAO Fensheng²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Nanjing Urban Planning & Research Center, 15 Gaojiujiuguan Road, Nanjing 210029, China)

Abstract: Three existing methods are compared, and a new ellipsoid expansion method considered ellipsoid misalignment is proposed based on analytic geometry theory. The influence on major semi-axis variation, station latitude variation and Gaussian Plain Coordinate caused by ellipsoid misalignment is examined. According to the experiments, the results from the proposed method and generalized geodesy derivation equation method agree well, and the proposed method is more intuitive.

Key words: ellipsoid expansion method; projection plane transformation; ellipsoid parallel misalignment; geodesy; distortion of projection

About the first author: WANG Lei, Ph.D candidate. His researching interests are geodesy and GNSS application.

E-mail: wl1986137@gmail.com