

筏式养殖区流速垂向分布公式的试验研究

匡翠萍¹, 李文斌¹, 单云驰², 江林锋¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 华东电力设计院有限公司, 上海 200063)

摘要:以模型长度比尺 $\lambda_l = l_p/l_m = 20$ (l_p, l_m 分别为原型和模型的长度)筏式养殖模型布置于矩形水槽中进行试验,对养殖区的典型位置进行流速垂向分布测量.首先利用明渠流理论,以常用对数函数曲线与抛物线曲线对流速垂向分布进行初步拟合与分析,按影响程度分为养殖区强影响区、中影响区与弱影响区.然后在箱线图上拟合公式来确定公式的系数,得到强影响区与中影响区流速垂向分布的抛物线型公式,前者的公式系数大于后者;得到弱影响区流速垂向分布的对数函数型公式.最后对比分析了养殖密度的影响,养殖密度增大,抛物线型公式的相应系数增大,对数函数型公式系数上、下限亦增大.

关键词: 筏式养殖; 物理试验; 流速垂向分布; 公式拟合
中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A

Experimental Research on Formulas of Velocity Distribution in Vertical Direction in Raft-culture Zones

KUANG Cuiping¹, LI Wenbin¹, SHAN Yunchi², JIANG Linfeng¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. East China Elect Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Physical experiments are carried out in a rectangular flume with a length scale of 20 models, and the velocity is measured in vertical particular depth. First, the velocity distributions in vertical direction are initial fitted by curves of the parabolic and logarithmic formula based on the theory of open channel flow and analyzed, the strongly affected zones, moderately affected zones and weakly affected zones are classified from the effect degree. Then, the formula coefficients are deduced by the method of Box-plot fitting, and the formulas of vertical velocity distribution are obtained with parabolic equation in strongly and moderately affected raft zones and coefficients of the former larger than the latter;

however, the logarithmic equation is more suitable to weakly affected zones. Finally, the analysis on effect of aquaculture density leads to the conclusion on the parabolic coefficients and the range of logarithmic coefficients increase with the density increasement.

Key words: raft-culture; physical experiments; vertical velocity distribution; formula fitting

近年来我国海水养殖发展迅速,筏式养殖作为主要浅海养殖方式之一^[1],从 20 世纪 50 年代海带筏式养殖开始,至今已经发展成为涉及藻类、贝类、鲍、参、海胆、蟹类等对象不可替代的养殖形式^[2].养殖区筏架和网笼的存在对流速影响不应忽视,使得区域水体交换能力下降^[3].Gibbs 等^[4]通过对新西兰贻贝养殖测量发现养殖区流速相比周围减少 30%;项福亭等^[5]对蓬莱湾扇贝养殖区流速调查发现 1975 年至 1990 年 15 年间养殖中心区最大流速减少近 75%,最小流速减少近 90%;O'Donncha 等^[6]使用棒条体模拟双绳延绳式吊样系统,在潮汐水槽模拟发现长绳间流速相比于外部减少 25%~30%.如今关于筏式养殖区流速变化的观测和物理试验研究多集中于流速减少比率的情况,而实际对于筏式养殖区的内部、边侧流速垂向分布特征研究仍待发展完善,樊星等^[7]对近岸养殖区潮流特征通过现场观测手段进行过研究,对养殖区潮流流速垂直结构特征研究做出探索.本文在矩形断面水槽中进行物理模型试验,将筏式养殖模型布置于水槽之中,设定来流为均匀流,对筏式养殖区的不同点位流速进行测量,利用明渠流流速垂向分布的常用两种形式——对数分布形式和抛物线形式,对流速测速结果进行两种形式拟合,分析确定公式系数,归纳总结得到筏式养殖区不同区域流速垂向分布公式和公式中系数的范围.

收稿日期: 2017-04-16

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201305003-5)、河北省国土资源厅科技项目和同济大学大型仪器设备开放测试基金

第一作者: 匡翠萍(1966-),女,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为河口海岸工程. E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

1 试验概况

1.1 试验设备

试验在同济大学 42 m 长波流水槽中进行, 水槽断面为矩形, 槽宽 $B=0.8$ m, 槽深 $H_0=1.2$ m.

通过造流装置控制保证来流为均匀流, 试验所用物理模型布置在水槽中间 10 m 范围内以保证试验区上下游一定过渡段长度. 流速测量设备为高精度三维流速测量仪 ADV (acoustic doppler velocimeter)——挪威 Nortek 点式流速仪, 此设备探头小巧, 可以直接连电脑进行实时数据记录, 采样体积最小 0.085 cm^3 , 可测量流速范围 $0\sim 4$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 采样输出频率最高 200 Hz, 实际采样频率 62.5 Hz, 即 0.016 s 读取记录一次流速数据, 实际测量时等待流速信号稳定后记录数据 1 min, 对所得数据作平均计算作为该点的流速值. 试验设备如图 1 所示.

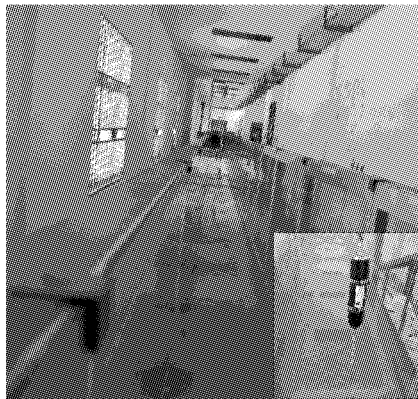


图 1 波流水槽和流速测量仪 ADV
Fig.1 Flume and ADV

1.2 试验方案设计

综合实验室实际状况并结合对秦皇岛昌黎县筏式养殖区的现场观测, 确定模型长度比尺 $\lambda_l=l_p/l_m$

$=20$ (l_p, l_m 分别表示原型和模型的长度), 制作物理试验养殖模型: 采用泡沫浮球、塑料圆柱体替代养殖浮球和吊笼, 泡沫浮球直径 20 mm, 塑料吊笼圆柱体长度为 100 mm, 直径 15 mm, 浮球与吊笼圆柱体以鱼线进行固定, 距离为 40 mm. 采用柔软抗拉的尼龙鱼线 (直径约 1 mm 对水流影响忽略) 替代浮绳、吊绳和锚绳. 每列浮绳以 10 cm 等间距固定 10 个吊笼模型, 后将列模型按一定间距布置于水槽中进行试验.

试验布设和单个模型规格如图 2 所示, 保持来流为均匀流, 流速测量点位共 7 个, 分别为 M 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F , 其中 M 点位于模型区前 2.5 m 处, 为远离模型区点位, 用于测量来流速度; A 、 B 、 C 点位于水槽布置模型一侧, 分别在模型区前 0.5 m, 模型中央和模型区后 0.5 m; D 、 E 、 F 点位于模型区旁侧, 与 A 、 B 、 C 点对称布置. 每个测点位垂向测量 4 个水深位置流速 (例如 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4), 相应水深分别为 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ (H 为水深).

在重力相似准则下^[8], 重力与惯性力的比例系数 F_r 相等:

$$F_r = \frac{v_p}{\sqrt{g_p l_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m l_m}} \quad (1)$$

式中: v 、 g 、 l 分别表示速度、重力加速度和长度; 下标 l 、 m 分别表示原型和模型.

当重力加速度不变时, 可得:

$$\frac{v_p}{\sqrt{l_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{l_m}} \quad (2)$$

即

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_l} = 4.47 \quad (3)$$

式中: λ_v 为速度比尺.

秦皇岛昌黎县是我国北方近海养殖大县, 近年来养殖规模逐年扩大, 参照秦皇岛养殖海域自然条

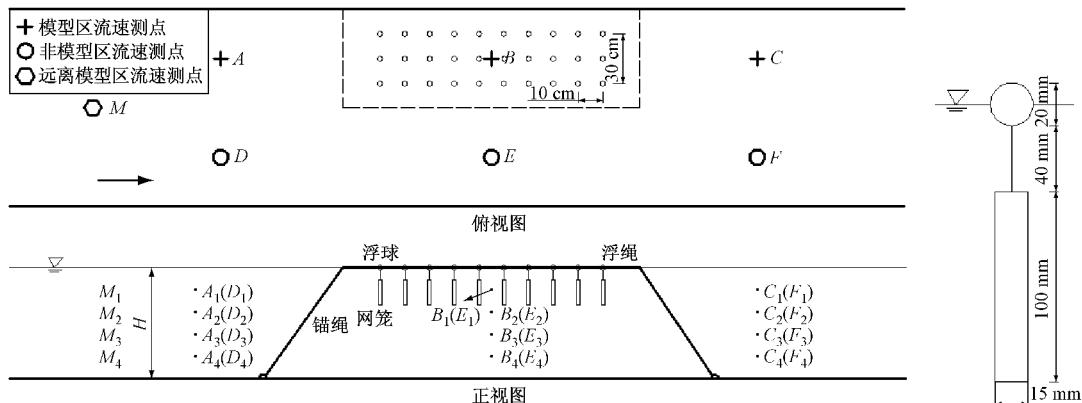


图 2 试验布设与模型规格

Fig.2 Layout of experiments and specification of models

件设定物理模型试验条件^[9]:海域潮流流速范围为 $0 \sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 设定物理模型试验流速范围为 $0 \sim 13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 近海养殖区水深 $6 \sim 12 \text{ m}$, 则试验水深范围为 $0.3 \sim 0.6 \text{ m}$.

如表 1 所示设定 11 组试验, 对每组试验的 7 个

测点进行 4 个垂向相对水深流速测量, 图 3 为 3 列实物模型及流速测量布置, 由于连结两个吊笼之间的尼龙鱼线接触 ADV 时会对测速产生影响, 所以 ADV 布置在 4 个吊笼中间, 与吊笼和鱼线非接触, 以保证流速测量稳定准确.

表 1 试验参数设置

Tab.1 Parameters of experiments

	组别										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
水深 H/cm	35	45	45	45	45	45	50	60	45	45	45
流速 $u/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	5	3	5	10	15	20	5	5	5	5	5
模型列数(养殖密度)	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	5
模型整体宽度/cm	30	30	30	30	30	30	30	30	20	40	40

1~8 组模型列数相同, 水深、流速不同, 通过对水深、流速进行量纲一化分析得到对应量纲一化流速垂向分布公式; 第 9、10、11 与第 3 组相比水深、流速相同, 模型列数即养殖密度不同, 引入与养殖密度相关的公式系数对公式进行修正.

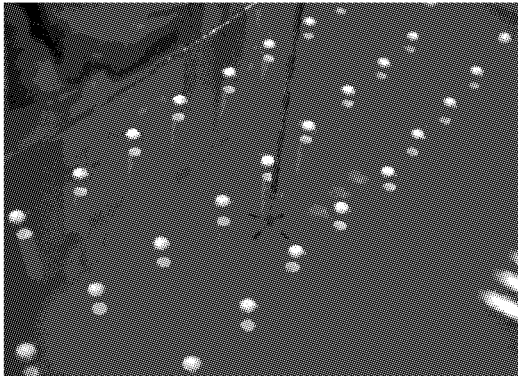


图 3 实物模型布置及流速测量

Fig.3 Layout of physical models and velocity measurements

2 试验结果分析

2.1 流速垂向分布公式

明渠水流是一种无压流, 目前针对矩形断面明渠流速垂向分布研究, 多使用的就是对数分布形式和抛物线形式两种流速分布规律^[10-13]:

对数流速垂向分布形式主要是根据 Prandtl 理论, 公式表示为^[14]

$$u = u_{\max} - \frac{u_*}{k} \ln \frac{H}{z} \quad (4)$$

式中: H 为明渠水深; z 为水中任一点到渠道底部的距离; k 为 Karman 常数; u_{\max} 为垂向最大流速, u 为水深 z 处的流速; u_* 为摩阻流速.

可以进一步简化得到:

$$\frac{u}{v} = a \cdot \ln\left(\frac{z}{H}\right) + b \quad (5)$$

式中: v 为 u 的垂向平均值; a 为与流速切应力相关的系数; b 为与流速相关的系数.

明渠的实际流速垂向分布利用抛物线形式进行描述, 可表示如下^[15]:

$$\frac{u}{v} = a' \left(\frac{z}{H}\right)^2 + b' \left(\frac{z}{H}\right) + c \quad (6)$$

式中: a' 、 b' 、 c 为待定系数.

2.2 流速拟合及分析

根据式(5)~(6)对不同组别的流速数据使用对数垂向分布形式和抛物线分布形式进行拟合, 量纲一化分析描述简洁具有普适性, 将测量数据以相对流速 u/v 为 y 轴, 相对水深 z/H 为 x 轴, 得到两种形式的拟合曲线和相应的流速垂向分布公式. 下面以第 1 组试验为例, 对 7 个测点进行拟合处理后得到图 4, 其中圆点为实测值, 虚线为拟合的对数函数曲线, 实线为拟合的抛物线曲线.

(1) 远离养殖区的 M 点:

M 点为远离筏式养殖区的点位, 流速几乎不受养殖区影响, 可作为明渠流流速垂向分布的参照点位, 整体上符合明渠流流速垂向分布特征, 使用两种函数形式拟合情况均较好, 拟合度 R^2 均达到 0.9 以上. 而两种曲线拟合结果亦有所差别, 对数函数曲线拟合在水面流速达到最大, 与实际流速分布略有出入, 抛物线曲线在水面附近拟合更好; 在明渠近底部流速接近于 0, 对数函数曲线拟合与明渠近底层流速情况更为接近.

(2) 养殖区一侧 A 、 B 、 C 点:

A 点位于养殖区前侧附近, 与 M 点位相比较流速分布总体趋势相近, 受养殖区影响较弱. B 点为位于养殖区内部点位, 因养殖区阻碍作用上层 $0.8 H$ 处 u/v 下降至 0.6 左右, 对数函数分布曲线在此区

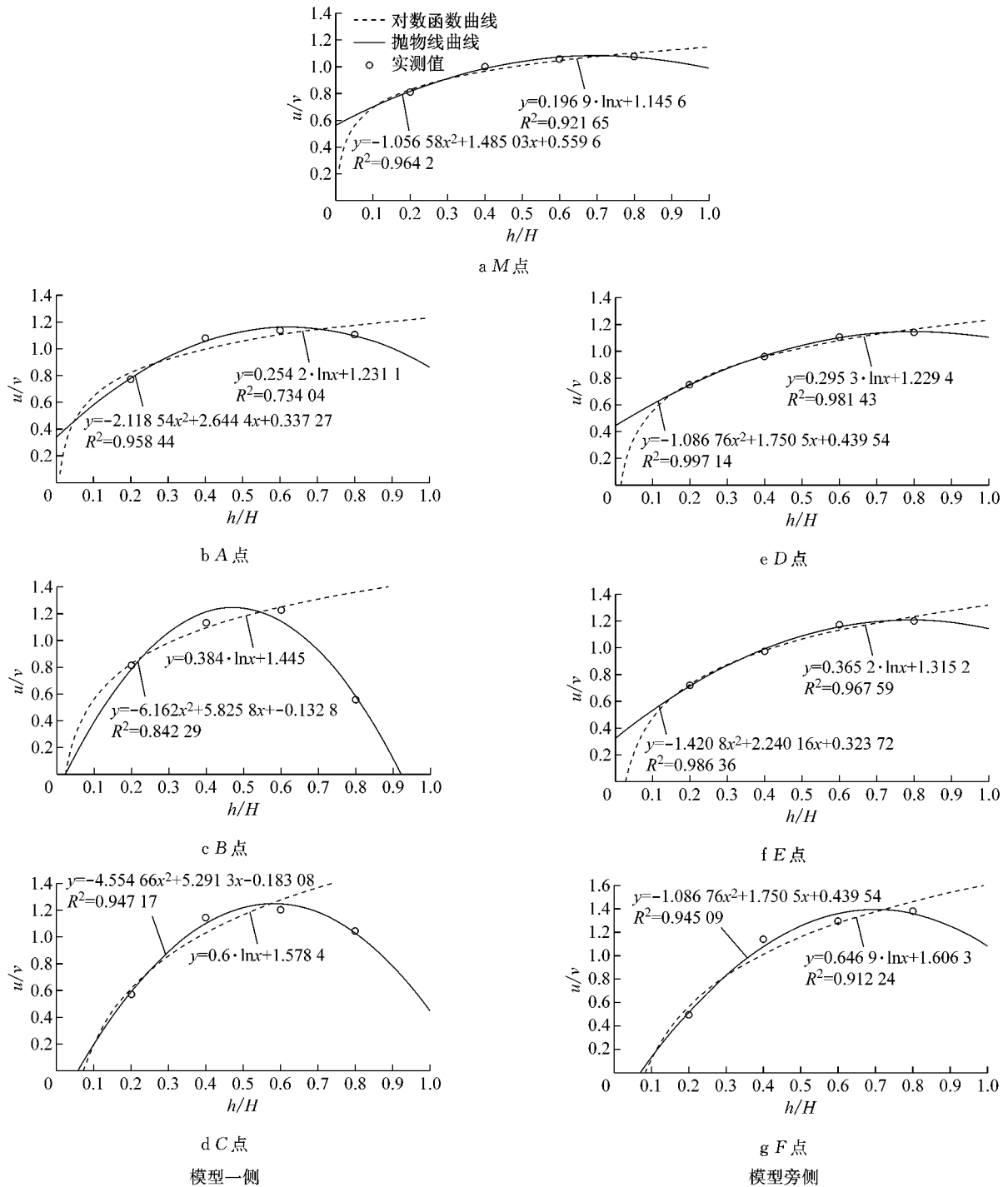


图 4 测点流速垂向分布拟合

Fig.4 Curve fitting of velocity distribution in vertical direction

域不适用,抛物线曲线拟合精度较好,拟合度 R^2 达到 0.84;C 点位于养殖区后侧,流速垂向分布形式与 B 点位相似,但上层 0.8 H 处 u/v 稍高于 B 点位,近底层 0.2 H 处 u/v 低于 B 点位,而相较于对数函数曲线,抛物线曲线拟合亦较好, R^2 达 0.92.

在养殖区一侧,垂向上养殖吊笼影响主要集中在水流上层,即(0.6~1.0)H 区域.由于养殖吊笼长度为 10 cm、试验水深范围为 35~50 cm,因此垂向

上养殖吊笼对下部区域(0~0.6H)影响甚微.

(3) 养殖区旁侧 D、E、F 点:

D、E、F 点位于养殖区旁侧,养殖区影响较弱与来流点位 M 点相比较趋势接近,上层 0.8 H 处流速有所增加,除 F 点位出现底层流速减小,其余拟合较好,拟合度 R^2 均达到 0.9 以上.

总体上看:养殖吊笼所在的上层区域流速变化较为明显,下部区域流速变化相对较小,因此分析侧

重于近表层区域流速变化分析. *B* 位于养殖区,属于强影响区域,表层流速下降较多,适宜以抛物线曲线进行拟合分析;而位于养殖区后侧的 *C* 点位较之 *B* 点位影响有所减小,属于中影响区域,适宜以抛物线曲线进行拟合分析. *D*、*E*、*F* 点位与 *A* 点位于养殖区旁侧与前侧,属于弱影响区域,表层流速增加,以对数函数曲线拟合较为适宜. 图 5 为 7 个测点对应的 7 条拟合曲线汇总.

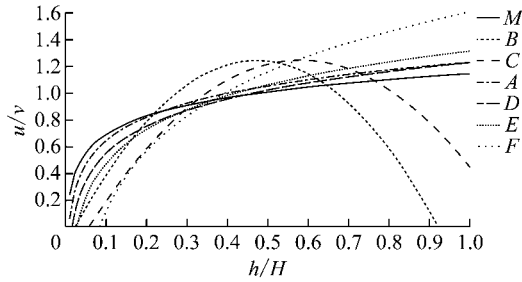
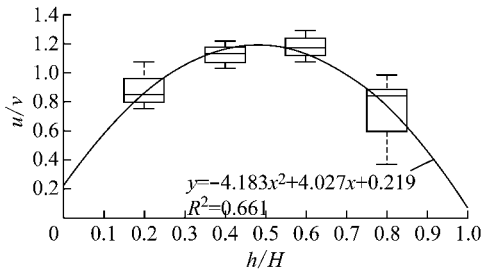


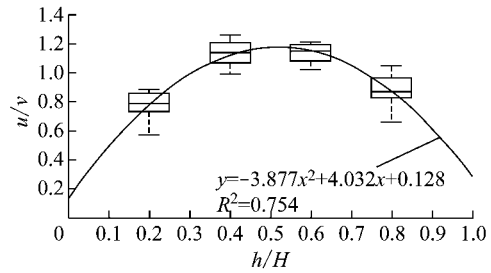
图 5 多测点流速垂向分布拟合汇总

Fig.5 Curve fitting of velocity distribution in vertical direction at several points

2.3 公式系数确定



a 强影响区(*B*点)



b 中影响区(*C*点)

图 6 基于箱线图的强和中影响区流速垂向分布拟合

Fig.6 Curve fitting of velocity distribution in vertical direction in strongly and moderately affected zones based on box-plot

2.4 养殖密度的影响与分析

第 9、3、10 和 11 组模型列数分别为 2、3、4、5,利用同上进行拟合,确定这 3 组不同养殖密度的公式系数如表 2、表 3.

表 2 为不同养殖密度下强影响区与中影响区流速垂向分布抛物线公式及其相应的系数,同样的公

为了全面反映试验数据样本信息,对公式中系数利用 Matlab 软件的箱线图进行分析确定,箱线图是用作显示一组数据分散情况资料的统计图. 对第 1~8 组实测数据量纲一化后绘制箱线图,在箱线图的基础上拟合曲线并确定公式系数.

B 点与 *C* 点为强影响区与中影响区的典型点位,箱线图上的拟合曲线如图 6 所示,并得到流速垂向分布抛物线函数公式:

$$\frac{u}{v} = -4.18\left(\frac{z}{H}\right)^2 + 4.03\left(\frac{z}{H}\right) + 0.22 \quad (7)$$

$$\frac{u}{v} = -3.88\left(\frac{z}{H}\right)^2 + 4.03\left(\frac{z}{H}\right) + 0.13 \quad (8)$$

A 点与 *D*、*E*、*F* 点相对于 *B*、*C* 点受养殖区影响较弱,属于弱影响区,箱线图上的拟合曲线如图 7 所示,综合 4 点位得到公式中系数的范围,得到弱影响区流速垂向分布对数函数公式:

$$\frac{u}{v} = (0.16 \sim 0.36)\ln\left(\frac{z}{H}\right) + (1.11 \sim 1.35) \quad (9)$$

式分布形式下,强影响区 *B* 点位系数 a' 与 b' 数值大于中影响区 *C* 点;随模型列数 2 列增加到 4 列,养殖密度增加后使得公式系数 a' 与 b' 数值呈现变大趋势,即拟合曲线的曲率变大,但系数 c 的数值变化较小.

表 2 不同养殖密度下强和中影响区的公式系数

Tab.2 Formula coefficients in strongly and moderately affected zones under different aquiculture densities

$$\frac{u}{v} = a'\left(\frac{z}{H}\right)^2 + b'\left(\frac{z}{H}\right) + c$$

系数 模型列数	a'				b'				c			
	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
<i>B</i> 点	-3.01	-4.18	-4.94	-6.90	3.28	4.03	3.91	5.98	0.25	0.22	0.33	0.02
<i>C</i> 点	-3.12	-3.88	-4.04	-5.88	3.14	4.03	4.76	5.62	0.34	0.13	0.13	-0.08

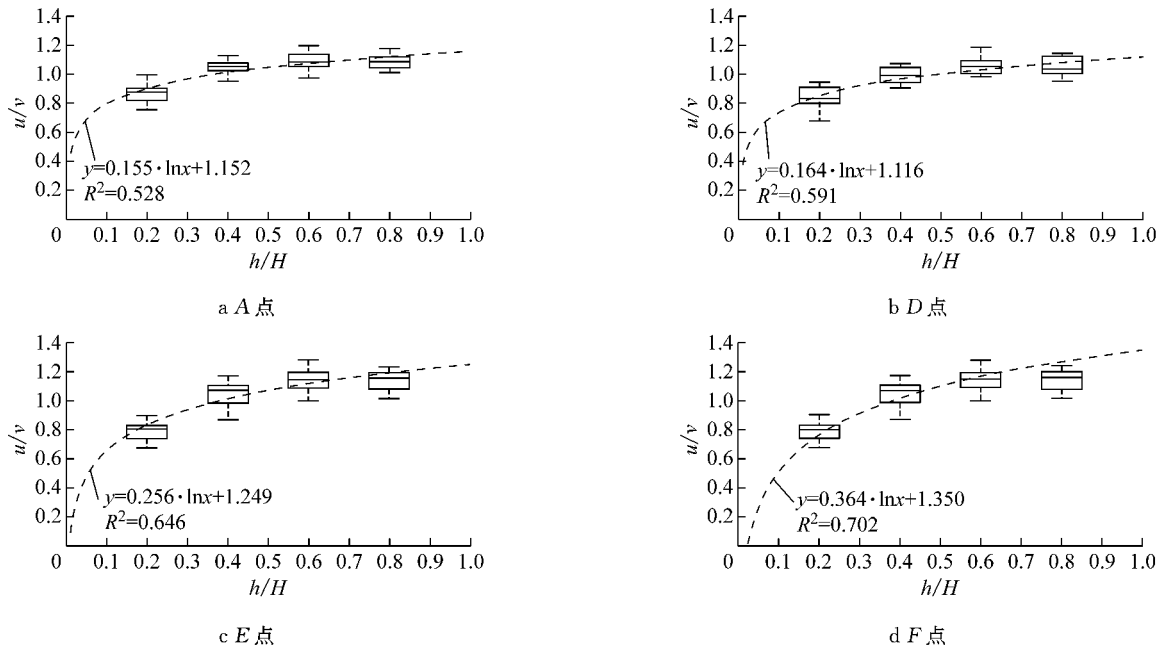


图 7 基于箱线图的弱影响区流速垂向分布拟合

Fig.7 Curve fitting of velocity distribution in vertical direction in weakly affected zones based on box-plot

表 3 不同养殖密度下弱影响区的公式系数

Tab.3 Formula coefficients in weakly affected zones under different aquaculture densities

$$\frac{u}{v} = a \cdot \ln\left(\frac{z}{H}\right) + b$$

系数 模型列数	a				b			
	2	3	4	5	2	3	4	5
A、D、E、F 点	0.14~0.34	1.07~1.32	0.16~0.36	1.11~1.35	0.27~0.32	1.23~1.44	0.23~0.35	1.13~1.39

表 3 为不同养殖密度下弱影响区与中影响区流速垂向分布对数函数公式及其相应的系数,随模型列数 2 列增加到 4 列,养殖密度增加使得公式中系数 a 和 b 的上、下限随之增大。

3 结论

本文在矩形水槽中进行了长度比尺为 20 筏式养殖区的水流实验,采用 ADV 进行了一系列流速垂向分布测量,利用明渠流理论,以对数函数曲线与抛物线曲线对流速垂向分布进行拟合与分析,按影响程度分为强影响区、中影响区与弱影响区,分别获得强影响区与中影响区流速垂向分布的抛物线型公式以及弱影响区流速垂向分布的对数函数型公式。基于箱线图上的拟合,得到三个区域对应的流速垂向分布公式中的系数以及变化范围。指出了养殖密度的影响特征,即养殖密度增大,抛物线型公式的相应系数增大,对数函数型公式系数上、下限亦增大。

参考文献:

[1] 康伟伟. 河北昌黎海水养殖对海洋生态环境影响研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2011.
KANG Weiwei. The impact of study of mariculture on marine ecology environment in Changli, Hebei Province [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2011.

[2] 丁刚,吴海一,郭萍萍,等. 我国海上筏式养殖模式的演变与发展趋势[J]. 中国渔业经济, 2013, 31(1): 164.
DING Gang, WU Haiyi, GUO Pingping, et al. Evolution and development trend of marine raft cultivation model in China [J]. Chinese Fisheries Economics, 2013, 31(1): 164.

[3] 李铁军,郭远明,徐汉祥,等. 近海筏式养殖造成的水文动力条件变化分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2012, 31(4): 329.
LI Tiejun, GUO Yuanming, XU Hanxiang, et al. Analysing the change of the hydrodynamic condition by suspension aquaculture in shore sea [J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science), 2012, 31(4): 329.

[4] GIBBS M M, JAMES M R, PICKMERE S E. Hydrodynamics and water column properties at six stations associated with mussel farming in Pelorus Sound[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1991, 25(3): 239.