

样本容量对明渠垂线流速分布对数公式拟合的影响

陈兴伟^{1,2}, 林炳青¹, 林木生¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007;

2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007)

摘要:针对明渠垂线流速分布测量样本容量对对数公式拟合的影响问题,通过水槽试验,应用激光多普勒测速仪,在0.2倍水深内布设110个点进行垂线流速测量;按相对等距原则,从110个测量数据中共生成11组不同样本容量的流速系列进行统计分析。结果表明:试验测得的垂线流速分布符合对数公式;对数公式拟合所得的摩阻流速、积分常数及其统计变量相关系数和变差系数随样本容量大小的变化而变化,当样本容量逐渐变大时,渐渐趋于稳定,符合统计理论的大数定律;合理反映垂线流速分布变化的试验,其测点需要一定的样本容量;试验得到的垂线流速在间距分布比较均匀的条件下,0.2倍水深内所需样本容量为50左右。

关键词:明渠流;垂线流速;流速分布;对数公式;样本容量

中图分类号:TV133.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)05-0035-03

Impact of sample size on the log-law fitting of vertical velocity distribution in open-channel flows//CHEN Xingwei^{1,2}, LIN Bingqing¹, LIN Musheng¹(1. College of Geographic Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to investigate the impact of sample size for open channel vertical velocity distribution measurement on the log-law fitting, 110 measuring points were arranged within a 0.2 times water depth in flume experiments. The vertical velocities were collected with a laser Doppler anemometer (LDA). Based on the relative equidistance principle, 11 sets of velocity of different sample sizes generated from the 110 velocity measurements were used to conduct statistical analysis. The results show that the vertical velocity distributions agree well with the log-law formula. The fitted friction velocity, integral constant, statistical variables and variation coefficient obtained from log-law fitting vary with the size of the samples. With the sample size increase, these parameters tend to be stable which is consistent with the statistical law of large numbers. It can be concluded that a certain sample size is needed at its measuring point to accurately reveal the vertical velocity distribution. According to the present test, a sample size of about 50 is necessary for a reasonable fitting result within 0.2 times water depth when the measurements are uniform distributed with same interval in the vertical direction.

Key words: open-channel flow; vertical velocity; velocity distribution; log-law formula; sample size

流速及其垂线分布是反映明渠水流运动特性的基本指标。从试验研究来讲,早期应用热膜仪(hot-film)开展了很多测量、分析^[1-2];20世纪80年代开始,激光多普勒测速仪逐渐得到普遍应用^[3],笔者^[4]应用激光多普勒测速仪对光滑和粗糙床面明渠的垂线流速分布进行了测量。另一方面,基于理论和试验研究,得到了不同形式的垂线流速分布公式,归纳起来主要有指数形式、对数形式以及抛物线等其他形式,其中尤以对数公式应用最为普遍。20世纪20年代,Prandtl^[5]根据自己的动量传递理论,提出了均匀流的对数流速分布形式;1938年,Kedegan^[6]将平板边界层的研究成果应用到明渠流,

指出明渠流动中断面流速呈对数规律分布;Nezu等^[3,7-9]利用二维激光多普勒测速仪研究了光滑壁面水槽均匀紊流,认为光滑壁面的明渠流动存在着黏性底层,在黏性底层内的流速呈线性分布,过渡区之外的流速分布遵循对数公式或尾流律,并根据实验给出了公式的相应参数。

流速分布对数公式的这些研究成果得到了广泛应用,如很多后来的水槽试验,通常先进行验证性试验,将结果与对数公式进行比较^[4,10];还有一个比较普遍的应用是利用实测的流速分布,通过给定卡门常数,可以根据对数公式反算摩阻流速^[11]。这些工作都需要将流速测量数据进行对数公式拟合。由

于水槽设置、测量仪器等因素导致的测量误差,试验数据一般都与所拟合的对数公式有一定偏离;即使是文献[3]的经典试验,数据拟合相关系数达0.955以上,也意味着数据与公式有一定的离散。分析这些研究成果,发现在试验方法上都存在一个问题:试验中垂线流速测量点的分布与数量的设置比较随意,数量通常较少,没有考虑测量点的数量,即样本容量对明渠垂线流速分布对数公式拟合的影响;近年关于粗糙床面的试验也存在同样的问题^[12]。本文通过水槽试验,应用激光多普勒测速仪对垂线流速分布进行测量,定量分析测点样本容量大小对明渠垂线流速分布对数公式拟合的影响。

1 试验装置和测量方法

试验在一个长20.0 m、宽0.8 m、深0.6 m的水槽中进行。水槽的可变坡底板为油漆过的钢板,两侧壁为玻璃。试验段距水槽进水口约12 m,以保证水流紊动充分发展。试验中,用精度为0.1 mm的测针量测水面高程,流量由安装在进水管道上的电磁流量计测量。采用丹麦DanTec生产的二维激光多普勒测速仪测量水槽中垂线上的流速分布,激光多普勒测速仪安装在高精度的三维坐标架上,位移精度为6.25 μm。

水槽底坡设定为水平,在水槽中进行了4组试验。前3组试验中的水深基本不变而调整流量,第4组变化水深。每次都待系统运行稳定后再进行垂线流速测量,且垂线位于断面的中心,以保证水流的二维结构。本次试验只测量纵向流速,表1给出了4组试验的水力参数。

表1 试验水力参数

试验 编号	水深 <i>H</i> /cm	水槽宽深比 <i>B</i> / <i>H</i>	断面平均流速 <i>u</i> /(m·s ⁻¹)	雷诺数 <i>Re</i>	弗劳德数 <i>Fr</i>
1	17.50	4.60	0.446	73 400	0.34
2	17.85	4.58	0.505	84 900	0.38
3	17.07	4.70	0.579	93 000	0.45
4	20.43	3.90	0.521	85 900	0.37

为满足试验要求,对测点的垂线分布作如下考虑:一是通常认为0.2倍水深内符合对数公式,故在0.2倍水深内测量;二是根据对数公式特点,采用接近床面测点间距小、远离床面测点间距大的原则,在0.2倍水深内,对前3组试验按0.2 mm间距20个点,然后0.3 mm、0.4 mm和0.5 mm间距各30个点的方式,共测110点流速数据以供分析。

2 试验结果分析

2.1 数据分析方法

如前所述,光滑壁面的明渠流动存在着黏性底

层,其内流速呈线性分布。黏性底层之上的区域称为过渡区,目前过渡区内尚无明确的流速分布表达式。通常黏性底层和过渡区在明渠流中只占很小部分。在过渡区之外的流速分布遵循对数公式:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu_*}{\nu} + A \tag{1}$$

式中:*y*为距床面的距离;*u*为距床面*y*处的流速;*u*_{*}为摩阻流速;*κ*为卡门常数;*ν*为黏性系数;*A*为积分常数。

式(1)中摩阻流速的确定可以有多种方法^[13],卡门常数通常取0.4,积分常数可取为5.3。鉴于本文的研究目的,取卡门常数为0.4,而摩阻流速和积分常数通过对数公式的拟合确定。图1所示为试验3垂线流速分布试验结果及其式(1)的拟合,相关系数达0.984,表明符合对数分布规律。4次试验数据通过式(1)拟合的结果为

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu_*}{\nu} + 4.9 \tag{2}$$

即积分常数*A*为4.9,与通常所接受的5.3相差无几,表明该试验设施所得试验结果合理可信。

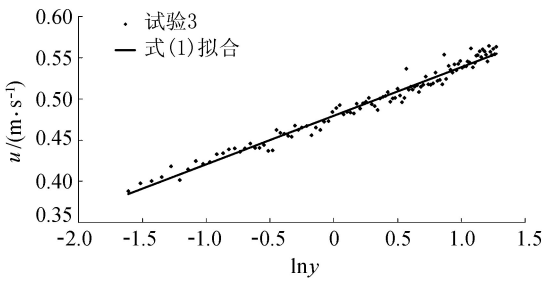


图1 垂线流速分布试验结果与对数公式拟合的比较

2.2 样本容量的影响

由统计理论的大数定律可知,样本容量越大,得到的统计值越稳定,但应以多少为宜未见报道。图1所示为单根垂线测量110个点的结果,测量工作量较大。将试验测得的每根垂线110个数据,按照尽量等间距的取样原则,生成分别含有10、20、30……100共10个新的数据系列,与原有110个数据一起,分别用对数公式(1)进行拟合,从而分析样本容量对拟合结果的影响。

如前所述,当卡门常数取为0.4时,将不同系列长度的每组数据通过式(1)进行拟合,可以得到摩阻流速*u*_{*}和积分常数*A*;同时相应得到反映数据拟合结果好坏的统计参数,如相关系数*R*²和变差系数*C_v*。这样,就可以计算得到4组试验中每组11个系列所对应的4个参数的变化,如图2所示。由图2(c)可知,除试验4两个系列相关系数为0.955左右外,其他都在0.960以上,甚至接近0.990,说明试验数据精度较高。

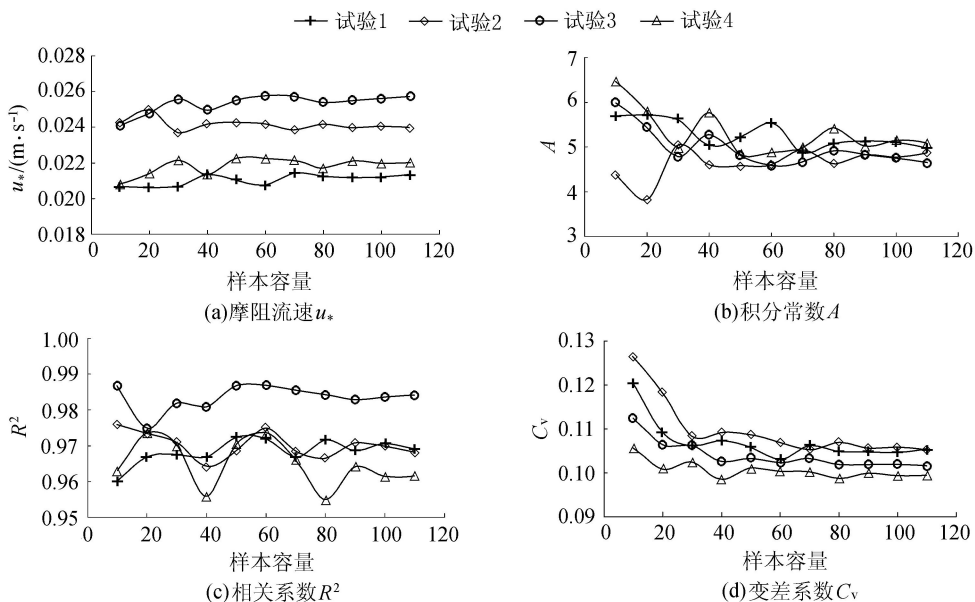


图2 u_* 、 A 、 R^2 和 C_v 随样本容量大小的变化

图2表明,4个参数的统计值随样本容量大小的变化而变化。比较而言,摩阻流速对样本容量的依赖较小,样本容量较小时也相对稳定;而其他3个参数随样本容量大小的变化较大,样本容量较小时波动较大。总体而言,样本容量越小,统计值的波动越大;当样本容量逐渐变大时,渐渐趋于稳定,充分体现了统计理论的大数定律。图2还表明,4个参数趋于稳定的样本容量阈值也有所不同。定性比较与定量分析表明,摩阻流速的阈值为40个测点,积分常数为50,而相关系数和变差系数在60以上。因此可以认为,比较稳定、合理的垂线流速分布的试验研究,测量的垂线点位需要一定的样本容量;对于本试验与测量系统而言,在间距比较均匀分布的条件下,0.2倍水深内所需的样本容量为50左右。

3 结论

a. 试验测得的垂线流速分布符合对数公式。

b. 应用对数公式拟合垂线流速分布测量数据所得的摩阻流速、积分常数及其统计变量相关系数和变差系数,其结果随样本容量大小的变化而变化;当样本容量逐渐变大时,渐渐趋于稳定,符合统计理论的大数定律。

c. 为了比较稳定、合理地反映垂线流速分布的变化,垂线的测点需要一定的样本容量;本文试验在间距比较均匀分布的条件下,0.2倍水深内所需样本容量为50左右,可以作为参考。

参考文献:

[1] BLINCO P H. Turbulent characteristics in free surface flows over smooth and rough boundary [J]. Journal of

Hydraulic Research,1971,9(1):43-69.
 [2] MCQUIVER R S, RICHARDSON E V. Some turbulence measurements in open-channel flow [J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE,1969(HY1):209-223.
 [3] NEZU I, RODI W. Open channel flow measurements with a laser Doppler anemometer [J]. Hydraulic Engineering, ASCE,1986,112(5):335-355.
 [4] CHEN Xingwei, CHIEW Y M. Response of velocity and turbulence to sudden change of bed roughness in open-channel flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,2003,129(1):35-43.
 [5] PRANDTL L. 流体力学概论[M]. 郭永怀,陆士嘉,译. 北京:科学出版社,1981.
 [6] KEDEGAN G H. Laws of turbulent flow in open channels [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standard,1938,21:707-741.
 [7] STEFFLER P M, Rajaratnam N, PETERSON A W. LDA measurements in open channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,1985,111(1):119-130.
 [8] DONG Zhennan, DING Yuan. Turbulence characteristics in smooth bed open channel flows [J]. Sciences in China: Series A,1990(2):244-256.
 [9] 苏丽,贾国珍. 明渠水流紊动特性的 LDV 试验研究 [J]. 水电能源科学,2011,29(3):95-96. (SU Li, JIA Guozhen. Experimental study on turbulence characteristics of water flow in open channels with LDV system [J]. Water Resources and Power,2011,29(3):95-96. (in Chinese))
 [10] 何建京,王惠民. 粗糙床面明渠水力特性研究 [J]. 水利水电工程学报,2004(3):19-23. (HE Jianjing, WANG Huimin. Hydraulic characteristics of open channel flow over a rough bed [J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(3):19-23. (in Chinese))

(下转第94页)

- [28] BUCHANAN B P, WALTER M T, NAGLE G N, et al. Monitoring and assessment of a river restoration project in central New York[J]. River Research and Applications, 2012, 28(2): 216-233.
 - [29] MOERKE A H, GERARD K J, LATIMORE J A, et al. Restoration of an Indiana, USA, stream: bridging the gap between basic and applied lotic ecology[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2004, 23: 647-660.
 - [30] MOERKE A H, LAMBERTI G A. Restoring stream ecosystems: lessons from a midwestern state [J]. Restoration Ecology, 2004, 12(3): 327-334.
 - [31] 孙东亚, 赵进勇, 董哲仁. 河流生态修复工程的评估准则[C]//水利部国际合作与科技司. 河流生态修复技术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 45-51.
 - [32] 刘芳, 周李. 我国城市河流基于层次分析法的生态修复评估[J]. 科技资讯, 2010(34): 104. (LIU Fang, ZHOU Li. Ecological restoration evaluation on urban river based on analytic hierarchy [J]. Science Information, 2010(34): 104. (in Chinese))
 - [33] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚, 等. 河流生态修复负反馈调节规划设计方法[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 1-9. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. River restoration planning and design method following negative feedback[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(9): 1-9. (in Chinese))
 - [34] 吕永鹏, 徐启新, 杨凯, 等. 城市河流生态修复的环境价值及实现机制[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 278-285. (LÜ Yongpeng, XU Qixin, YANG Kai, et al. Environmental value of urban river eco-restoration and its realization mechanism [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 278-285. (in Chinese))
 - [35] 李传奇, 王薇. 河流生态修复成本效益分析研究[J]. 人民长江, 2008, 39(5): 55-57. (LI Chuanqi, WANG Wei. Cost and benefits analysis on river restoration [J]. Yangtze River, 2008, 39(5): 55-57. (in Chinese))
 - [36] 吴阿娜, 车越, 杨凯, 等. 城市内河综合整治效益的后评估方法及实证[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1088-1093. (WU Anuo, CHE Yue, YANG Kai, et al. Method for post evaluation of urban river regulation and case study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1088-1093. (in Chinese))
 - [37] 陈兴茹, 梁洪华, 白音包力皋, 等. 基于公众调查的水边空间环境整治后效分析: 以转河为例[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 9-12. (CHEN Xingru, LIANG Honghua, BAIYINBAOLIGAO, et al. Analysis on aftereffect of improvement on spatial environment of buffer zone based on public investigation: a case study on Zhuanhe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(3): 9-12. (in Chinese))
 - [38] 陈兴茹, 梁洪华, 白音包力皋, 等. 基于公众调查的菖蒲河滨水空间环境整治后效分析[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(增刊1): 24-27. (CHEN Xingru, LIANG Honghua, BAIYINBAOLIGAO, et al. Post-evaluation of Changpu River regulation based on public investigation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(Sup1): 24-27. (in Chinese))
 - [39] 陈兴茹, 王兴勇, 赵东亮, 等. 基于公众调查的北京元大都遗址公园水环境整治后效分析[J]. 天津大学学报, 2008, 41(增刊1): 66-70. (CHEN Xingru, WANG Xingyong, ZHAO Dongliang, et al. Study on the aftereffect of Beijing Yuandadu Relic Park's water-environment improvement based on public survey [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(Sup1): 66-70. (in Chinese))
 - [40] 江苏省林业局. 江苏省开展苏州太湖国家旅游度假区生态湿地恢复一期项目后评价[EB/OL]. [2010-01-05]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/02/content-218996.html>.
 - [41] 王华. 河流生态系统恢复评价方法及指标体系研究: 以黄浦江、苏州河为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
 - [42] 王秀英, 王东胜, 梁洪华. 城市河流生态恢复能力评价指标[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(6): 691-695. (WANG Xiuying, WANG Dongsheng, LIANG Honghua. Assessment of ecological restoration capacity of urban river[J]. Engineering Journal of Wuhan University [J]. 2011, 44(6): 691-695. (in Chinese))
- (收稿日期: 2012-11-09 编辑: 熊水斌)
- + + + + +
- (上接第 37 页)
- [11] 刘春晶, 李丹勋, 王兴奎. 明渠均匀流的摩阻流速及流速分布[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 950-955. (LIU Chunjing, LI Danxun, WANG Xingkui. Experimental study on friction velocity and velocity profile of open channel flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 950-955. (in Chinese))
 - [12] WANG X Y, YANG Q Y, LU W Z, et al. Experimental study of near-wall turbulent characteristics in an open-channel with gravel bed using an acoustic Doppler velocimeter[J]. Experiments in Fluids, 2012(52): 85-94.
 - [13] NEZU I, NAKAGAWA H. Turbulence in open channel flows [M]. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1993.
- (收稿日期: 2012-10-08 编辑: 熊水斌)