

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.017

U形渠道流速分布特性分析与试验*

杨士红¹ 韩金旭² 彭世彰¹ 韩 栋³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;
2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 3. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100053)

【摘要】 依据室内试验和田间实测资料,分析了U形渠道水流流速分布特性,建立了U形渠道水流横向流速分布指数律、垂向流速分布双幂律,给出了相关参数的确定方法,并提出了基于U形渠道水流分布规律的明渠测流计算断面中线“三点法”。实测资料验证表明:中线“三点法”在室内不同工况计算流量相对误差均在±4%范围内;除个别测点外,现场实测计算流量相对误差也在±5%范围内,说明中线“三点法”计算精确。与流速-面积法需9个测点相比,中线“三点法”节省了60%以上的测流工作量。

关键词: 灌区 U形渠道 流速分布 双幂律 中线“三点法”

中图分类号: S274.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0092-05

Analysis and Experiment of Distribution Properties and Its Application of Velocity in U-shaped Open Channel

Yang Shihong¹ Han Jinxu² Peng Shizhang¹ Han Dong³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China
3. State Center on Irrigation and Drainage, Beijing 100053, China)

Abstract

Based on indoor and field experiments, velocity distribution properties of U-shaped open channel were analyzed. Exponent formula for horizontal velocity distribution properties and two-power law for vertical velocity distribution properties were established. The methods to define the parameters were given. Then the midline three-point for flow measurement of open channel was put forward based on the velocity distribution properties of U-shaped channel. The fractional errors of flow velocities calculated by the midline three-point method in indoor experiment under different operating conditions and field experiment were within ±4% and ±5%, respectively. Validations showed that the midline three-point method increased the computational accuracy of flow measurement in open channel. In addition, the workload of the flow measurement by the midline three-point method was substantially reduced by more than 60% compared with velocity-section method which needed nine measuring points.

Key words Irrigation district, U-shaped channel, Velocity distribution, Two-power law, Midline three point method

引言

20世纪70年代以来,U形渠道在我国灌区得

到了大面积的推广和应用^[1],与梯形、矩形渠道相比,U形渠道具有明显的优越性^[2~3]。但由于应用时间相对较短,加之渠道结构存在差异,使得建立在

收稿日期: 2011-12-22 修回日期: 2012-01-15

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD25B07)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2012-15)

作者简介: 杨士红,博士后,主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究,E-mail: ysh7731@hhu.edu.cn

通讯作者: 彭世彰,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究,E-mail: szpeng@hhu.edu.cn

梯形及矩形渠道上的测流技术无法与 U 形渠道实现对接,降低了其测流精度,对灌区用水调度与管理造成很大影响^[4-5]。杨士红等^[6]在研究 U 形渠道水流特性的基础上提出采用双幂律描述明渠流垂向流速分布,取得了较好效果,但未就其在测流工作中的应用开展进一步的探索。可见,在明确 U 形渠道水流分布规律的基础上,提出简单实用的 U 形渠道测量技术具有重要的现实意义^[7-9]。本文以 U 形渠道为研究对象,结合江苏省高邮灌区生产实际和室内模拟试验,分析 U 形渠道水流流速变化特点,提出流速横向与垂向分布公式,在此基础上建立 U 形渠道测流新方法。

1 试验设计与方法

1.1 试验设计

实测试验分为室内试验及田间实测两部分。田间实测在江苏省高邮灌区进行,试验渠道为末级 U 形渠道,水流流速利用光电流速仪进行测量。室内试验在河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室水环境综合治理实验厅进行。试验水槽以田间实际渠道为原型按 1:1 比例修建。水槽为混凝土结构,长 20 m,深 0.8 m,底部弧形段为半圆形,半径为 0.4 m,上部梯形段边坡系数 $m = 0.05$,水槽底坡度为 0.000 2。试验利用超声波多普勒流速仪 (ADV) 测量水流流速。

1.2 测定方法

室内试验测量段布置在水槽中部 8 ~ 12 m 范围内,水位由测针测得,流量采用薄壁堰测量。室内水槽测流断面自中垂线向边壁每 3 cm 布置一条测线,各测线自水面向下每 3 cm 划分一个测点;田间试验测流断面自中垂线向边坡一侧布置 4 条测线,中垂线自水面向下每 5 cm 划分一个测点,另外 3 条测线只测量距水面 $0.2h$ (h 为测线深度)、 $0.6h$ 及 $0.8h$ 3 点流速,运用流速-面积法计算流量。

光电流速仪测量流速时,单一测点重复测量 5 次以上,取平均值;ADV 测定流速数据时,采样频率为 25 Hz,单点采样 2 000 次,单次采样历时 80 s。

2 U 形渠道流速垂向分布规律

2.1 流速垂向分布双幂律

分析室内试验及田间实测结果发现,U 形渠道水流流速随测点位置不同而变化,最大流速出现在水面以下。胡春宏^[10]等认为水面的“虚拟边壁”作用是最大流速出现在水面以下的主要原因。考虑到水面对流速的阻滞作用,将自由水面概化为糙率很小的边壁,以此满足最大流速在水面以下的产生条

件,采用能够表达非对称封闭渠道上下底面共同影响的双幂律描述测线流速分布^[11],引入无量纲量 $u/\bar{U}$ (相对流速) 及 y/h (相对水深),垂线上相对流速与相对水深的函数关系可表示为

$$\frac{u}{\bar{U}} = a \left(1 - \frac{y}{h} \right)^b \left(\frac{y}{h} \right)^c \quad (1)$$

式中 u ——测点流速, m/s
 $\bar{U}$ ——测线平均流速, m/s
 y ——测点与渠底距离, m
 h ——测线深度, m
 a, b, c ——待定参数

2.2 双幂律系数分析与确定

分析试验数据及式 (1) 发现,系数 a 与水流流速的变化梯度有关, a 值随流速梯度的增大而增大;同一断面上,各测线 a 值由中线向边壁逐渐增大,也与流速变化梯度由中线向边壁逐渐加大的趋势相同。经研究发现,采用 y/h 为 0.2、0.6、0.8 处测点的相对流速可以表征流速梯度。令

$$f(u) = u_{0.2} + u_{0.8} \quad (2)$$

式中 $u_{0.2}, u_{0.8}$ ——测线 y/h 为 0.2、0.8 处测点流速, m/s

分析表明 $u_{0.6}/f(u)$ 与 a, b 均呈显著的线性相关关系 ($u_{0.6}$ 为 $y/h = 0.6$ 处测点流速), R^2 达 0.97 以上,系数 a, b 计算公式为

$$a = 7.676\,9 \frac{u_{0.6}}{f(u)} - 2.875\,9 \quad (3)$$

$$b = 5.372\,1 \frac{u_{0.6}}{f(u)} - 2.696\,9 \quad (4)$$

将式 (1) 两侧同取对数为

$$\ln \frac{u}{\bar{U}} = \ln a + b \ln \left(1 - \frac{y}{h} \right) + c \ln \frac{y}{h} \quad (5)$$

根据式 (5) 可知,对于已知断面的任一测点 $\ln \frac{u}{\bar{U}}, \ln \left(1 - \frac{y}{h} \right), \ln \frac{y}{h}$ 均为确定值,令 $\ln \frac{u}{\bar{U}} = w, \ln \left(1 - \frac{y}{h} \right) = n, \ln \frac{y}{h} = k$, 则式 (5) 转换为

$$nb + kc = -\ln a + w \quad (6)$$

根据实测数据对 a 与 $(b + c)$ 进行分析,两者存在良好的相关关系,经拟合得到

$$b + c = 1.203\,5 \ln a - 0.003\,1 \quad (7)$$

$$c = 1.203\,5 \ln a - \frac{5.372\,1 u_{0.6}}{f(u)} + 2.693\,8 \quad (8)$$

2.3 双幂律结果验证

表 1 为根据试验资料,利用式 (3)、(4)、(8) 计算相关参数,采用双幂律对断面不同测线流速分布拟合结果,表中 Q 表示流量, B 为渠道宽度, x 为测线至中垂线距离, $(B - 2x)/B$ 为测线横向相对位

置。分析表 1 可知,在不同工况条件下,采用双幂律计算垂向流速分布结果与实测值具有极好的相关性, R^2 均在 0.97 以上,双幂律可以精确反映 U 形渠道流速分布的真实情况。

表 1 多元非线性回归结果及相关系数
Tab.1 Results of multivariate nonlinear regression and coefficients of correlation

$Q/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	h/m	F_r	$(B-2x)/B$	a	b	c	$c/(b+c)$	R^2
0.046 92	0.363 5	0.020 0	1.00	1.246	0.080	0.203	0.717	0.989
0.037 31	0.486 4	0.003 5	1.00	1.106	0.019	0.073	0.793	0.995
0.046 92	0.350 4	0.025 2	1.00	1.207	0.091	0.145	0.614	0.972
0.080 21 *	0.491 0 *	0.015 7	1.00	1.759	0.101	0.536	0.841	0.997
0.035 04 *	0.500 0 *	0.002 8	1.00	1.500	0.080	0.354	0.816	0.988
0.112 17 *	0.561 2 *	0.019 0	1.00	1.287	0.049	0.241	0.831	0.991
0.045 93	0.410 1	0.009 9	0.87	1.183	0.079	0.128	0.618	0.985
			0.50	1.349	0.132	0.242	0.647	0.977
			0.25	1.156	0.059	0.112	0.655	0.968
			0.80	1.069	0.025	0.055	0.683	0.987
0.066 62	0.415 8	0.019 7	0.65	1.149	0.043	0.105	0.707	0.989
			0.33	1.286	0.083	0.223	0.729	0.988

注: * 表示田间实测数据,其余为室内试验结果。

3 U 形渠道流速横向分布规律

3.1 流速横向分布指数规律

由图 1(u_i 为断面第 i 流层测点流速; u_{im} 为第 i 流层最大流速,即中点流速)可知,渠道断面水流流速值由边壁至中心逐渐增大。试验分析发现流速与横向位置之间呈现指数关系。

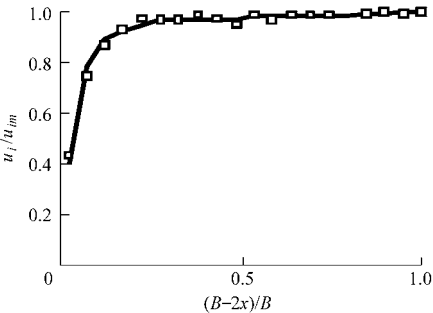


图 1 断面流速横向分布示意图

Fig.1 Distribution properties of horizontal velocity

取测点流速与流层最大流速(中垂线流速)的比值为相对流速,相对流速与相对位置间的函数关系为

$$\frac{u_i}{u_{im}}=p\left(\frac{B_i-2x}{B_i}\right)^q\tag{9}$$

式中 B_i ——第 i 流层宽度,m
 p 、 q ——待定系数

当测点位于中垂线上时($p=1$),横向相对流速分布可表示为

$$\frac{u_i}{u_{im}}=\left(\frac{B_i-2x}{B_i}\right)^q\tag{10}$$

不同流层 q 值有所不同,根据拟合结果各流层

q 值计算公式为

$$q=0.178\,7\left(\frac{y}{h}\right)^2-0.254\,6\left(\frac{y}{h}\right)+0.184\,8\tag{11}$$

3.2 流速横向分布指数规律验证

根据式(9)与式(10)计算室内实测数据(表 2),分析测点流速计算值与实测值间误差可知,式(9)具有较好的计算精度,在 $(B_i-2x)/B_i>0.25$ 的范围内,除极少数点外,计算流速相对误差在 $\pm 5\%$ 范围内,在靠近边壁的区域范围内 $((B_i-2x)/B_i<0.25)$,计算流速存在较大误差,这与壁面剪切力对测点流速值影响增大有关^[12]。

表 2 计算流速验证
Tab.2 Validation by experimental velocity

y/h	$(B_i-2x)/B_i$	流速实测值 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	流速计算值 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对误差 $\text{\%}$
0.93	0.97	0.292	0.291	-0.26
	0.75	0.288	0.283	-1.63
	0.45	0.282	0.269	-4.67
	0.37	0.281	0.264	-6.11
	0.22	0.278	0.250	-9.95
	0.15	0.266	0.240	-9.71
0.87	0.92	0.188	0.189	0.66
	0.85	0.188	0.188	0.04
	0.70	0.186	0.184	-0.97
	0.62	0.186	0.182	-2.01
	0.32	0.180	0.172	-4.44
	0.17	0.173	0.161	-7.13
0.57	0.92	0.168	0.167	-0.80
	0.76	0.166	0.164	-1.34
	0.53	0.163	0.158	-3.05
	0.37	0.161	0.155	-3.73
	0.21	0.160	0.150	-6.25
	0.14	0.158	0.138	-12.46

4 明渠流速分布律的实际应用

4.1 计算方法与步骤

在双幂律及指数规律的基础上,将 U 形渠道按深度方向划分子部分,按照中线“三点法”计算流量,基本步骤及方法如下:

(1)测量中垂线 y/h 为 0.2、0.6、0.8 处流速值,根据式(1)推导流速垂向分布规律,得到中垂线流速分布及平均流速。

(2)根据渠道水位将渠道划分为若干流层,各流层面积计算公式为

$$\Delta A = \Delta h \frac{B_i + B_{i+1}}{2} = \frac{(y_i - y_{i+1})(B_i + B_{i+1})}{2}$$

(12)

其中

$$B_i = \begin{cases} 2[m(y_i - r) + r] & (y_i \geq r) \\ 2\sqrt{2ry_i - y_i^2} & (y_i < r) \end{cases}$$

式中 m ——边坡系数 r ——底弧半径, m
 y_i ——流层高度, m

(3)利用式(10),根据式(12)积分求得第 i 流

层流量

$$\Delta Q_i = \int_0^{\frac{B_i}{2}} u_i \Delta h dx =$$
$$\int_0^{\frac{B_i}{2}} \left(\frac{B_i - 2x}{B_i} \right)^q u_{im} \Delta h dx = \frac{1}{q+1} u_{im} \Delta A_i$$

(13)

式中 u_{im} ——第 i 流层最大流速,即中点流速
 q 、 u_{im} 、 ΔA_i 分别按式(11)、式(1)及式(12)确定。

(4)将各流层流量累加,得到断面过流流量计算公式为

$$Q = 2 \sum_{i=1}^n \Delta Q_i$$

(14)

4.2 流量计算验证

为验证中线“三点法”测流的精确程度及适用范围,运用大量水槽及田间实测资料进行精度验证。通过分析表 3 与表 4 可知,中线“三点法”计算精度相对较高,室内不同工况计算流量相对误差均在 $\pm 4\%$ 范围内;现场实测情况除个别测点外,相对误差也在 $\pm 5\%$ 范围内,结果精确,可以满足测流要求,可作为 U 形渠道测流使用。

表 3 室内试验计算流量验证
Tab.3 Validation by indoor experimental flow

试验序号	h/m	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			相对误差/ $\%$	
		实测值	流速-面积法计算值	中线“三点法”计算值	流速-面积法	中线“三点法”
1	0.350 4	0.046 92	0.045 44	0.047 12	-3.16	0.42
2	0.486 4	0.037 31	0.037 52	0.037 15	0.57	-0.43
3	0.392 3	0.046 92	0.046 00	0.047 34	-1.97	0.89
4	0.410 1	0.045 93	0.043 76	0.044 30	-4.71	-3.54
5	0.363 5	0.046 92	0.045 75	0.045 14	-2.50	-3.79
6	0.415 8	0.066 62	0.060 87	0.065 66	-8.64	-1.45
7	0.387 9	0.052 74		0.052 62		-0.22
8	0.414 7	0.056 38	0.055 26	0.055 72	-1.99	-1.97
9	0.408 7	0.037 19		0.037 69		1.35
10	0.492 5	0.046 92	0.048 05	0.046 90	2.40	-0.05
11	0.461 9	0.046 92	0.047 23	0.047 81	0.65	1.89
12	0.494 6	0.066 96	0.064 20	0.066 08	-4.12	-1.31

比较表 3 及表 4 可以发现,与传统的流速-面积法相比,中线“三点法”具有更高的测流精度。同时,就测流工作量来讲,依据 GB/T 21303—2007《灌溉渠道系统量水规范》的有关要求,流速-面积法测流平均按单一断面测量 3 条测线,每一测线测量 3 个测点计算,需要测量 9 个测点,而中线“三点法”

只需测量 1 条测线的 3 个测点。与流速-面积法相比,中线“三点法”测流节省了 60% 以上的工作量,减少了工作时间。此外,采用中线“三点法”测流的意义还在于,较短的操作时间更好地适应了田间渠道水流形态变化迅速的特点,降低了由于操作历时过长而产生的测流误差。

表 4 现场实测计算流量验证

Tab.4 Validation by field experimental flow

试验序号	h/m	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		相对误差 /%
		实测值	计算值	
1	0.600 0	0.138 32	0.147 41	6.57
2	0.490 0	0.069 66	0.070 76	1.58
3	0.660 0	0.038 32	0.038 47	0.39
4	0.570 0	0.123 33	0.124 13	0.65
5	0.450 0	0.049 37	0.047 75	-3.28
6	0.520 0	0.091 13	0.091 17	0.04
7	0.490 0	0.080 21	0.081 74	1.91
8	0.560 0	0.112 17	0.108 36	-3.40
9	0.580 0	0.081 36	0.086 74	6.61
10	0.450 0	0.146 35	0.146 35	0
11	0.560 0	0.079 49	0.076 78	-3.41
12	0.450 0	0.076 63	0.070 80	-7.61
13	0.560 0	0.079 49	0.076 81	-3.37
14	0.635 0	0.087 01	0.082 75	-4.90

5 结论

(1)采用双幂律表达 U 形渠道水流流速垂向分布具有较高的精确程度。通过室内及田间实测资料检验,除个别测点外,垂向流速分布公式计算值的相对误差均在 $\pm 5\%$ 范围内,水流流速垂向分布双幂律适用于 U 形渠道流速分布规律计算。

(2)基于 U 形渠道水流横、垂向流速分布规律提出的中线“三点法”,具有较高的计算精度和广泛的适应性。根据对室内试验及田间实测数据的比较分析可知,中线“三点法”计算精确,操作简单,计算流量与实测值之间相对误差较小,在不降低测流精度的前提下,大大减少了测流工作量,可以在灌区测流工作中推广使用。

参 考 文 献

1 张志昌. U 形渠道量水设施综述 [J]. 西安理工大学学报, 1995, 11(3): 214 ~ 219.
Zhang Zhichang. Review of flow-measuring facilities of U-shaped channel [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1995, 11(3): 214 ~ 219. (in Chinese)

2 郝红科, 张志昌, 辛雪峰. U 形渠道量水槽的比较与选型 [J]. 中国农村水利水电, 2011(4): 119 ~ 121, 125.

3 吕宏兴, 冯家涛. 明渠水力最佳断面的比较 [J]. 人民长江, 1994, 25(11): 42 ~ 45.

4 吕宏兴, 吕德生, 史菊兰. U 形渠道断面测流方法 [J]. 中国农村水利水电, 2001(7): 24 ~ 25.
Lü Hongxing, Lü Desheng, Shi Julan. Flow measurement method for canals of U-shaped cross-section [J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(7): 24 ~ 25. (in Chinese)

5 郝红科, 雷新利, 张玉玲. U 形渠道断面流速分布规律试验研究 [J]. 杨凌职业技术学院学报, 2006, 5(2): 8 ~ 10.
Hao Hongke, Lei Xinli, Zhang Yuling. Research on the velocity of flow index distributed rule of U channel [J]. Journal of Yangling Vocational & Technical College, 2006, 5(2): 8 ~ 10. (in Chinese)

6 杨士红, 韩金旭, 彭世彰, 等. U 形渠道水流流速垂向分布规律及模拟 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3): 310 ~ 314.
Yang Shihong, Han Jinxu, Peng Shizhang, et al. Vertical distribution of streamwise velocity and its prediction in U-shaped channel [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3): 310 ~ 314. (in Chinese)

7 胡云进, 万五一, 蔡甫款, 等. 窄深矩形断面明渠流速分布的研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(1): 183 ~ 187.
Hu Yunjin, Wan Wuyi, Cai Fukuan, et al. Velocity distribution in narrow and deep rectangular open channels [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 183 ~ 187. (in Chinese)

8 孙东坡, 王二平, 董志慧, 等. 矩形断面明渠流速分布的研究及应用 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004, 19(2): 144 ~ 151.
Sun Dongpo, Wang Erping, Dong Zhihui, et al. Discussion and application of velocity profile in open channel with rectangular cross-section [J]. Journal of Hydrodynamics Ser. A, 2004, 19(2): 144 ~ 151. (in Chinese)

9 严军, 王二平, 孙东坡, 等. 矩形断面明渠流速分布特性的试验研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005, 38(5): 59 ~ 64.
Yan Jun, Wang Erping, Sun Dongpo. Experimental study on distribution properties of velocity in rectangular open channel [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(5): 59 ~ 64. (in Chinese)

10 胡春宏, 倪晋仁. 矩形明槽中断面紊流流速分布规律的初步研究 [J]. 水利水运科学研究, 1988(2): 27 ~ 36.
Hu Chunhong, Ni Jinren. Study on the law of turbulent velocity profile in rectangular open channels [J]. Hydro-Science and Engineering, 1988(2): 27 ~ 36. (in Chinese)

11 茅泽育, 马吉明, 余云童, 等. 封冻河道的阻力研究 [J]. 水利学报, 2002(5): 59 ~ 64.
Mao Zeyu, Ma Jiming, She Yuntong, et al. Hydraulic resistance of ice-covered river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(5): 59 ~ 64. (in Chinese)

12 雒天峰, 吕宏兴, 王红霞. U 形渠道竖向流速分布规律及测流技术研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 77 ~ 81.
Luo Tianfeng, Lü Hongxing, Wang Hongxia. Velocity distribution of vertical and measurement technology in open vhnannel with U-shaped cross-section [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 77 ~ 81. (in Chinese)