

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.02.005

曝气转盘作用下的氧化沟流场特性

李志杰 ,何建京 ,许 言 ,宋怀辉

(河海大学力学与材料学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 采用声学多普勒测速仪(ADV)在 1 号、2 号曝气转盘同时运行时测量氧化沟模型内流速场 ,通过对流速场测量数据的拟合分析 ,得到氧化沟第 2 直道内曝气转盘上游、下游流速沿程变化的数学表达式 . 研究表明 ,曝气转盘上游、下游流速沿垂线分布、横向分布、内外分区界限及沿程变化规律均不同 ,曝气转盘上游水力特性与典型明渠中弯道出流相似 ,曝气转盘下游水力特性与典型明渠明显不同 .

关键词 氧化沟 ;ADV ;曝气转盘 ;流速分布 ;非典型明渠水流

中图分类号 :X52 **文献标志码** :A **文章编号** :1000-1980(2011)02-0143-05

氧化沟技术是一种能有效去除污水中有机物和营养物质的生物处理技术 ,国内应用广泛^[1] . Orbal 氧化沟^[2]为矩形断面的环形沟渠 ,沟内水流由曝气转盘提供推动力 ,在沟内循环流动 ,可视为一种自由剪切射流与典型明渠流动的混合流动 . 运行实践表明 ,氧化沟的水力特性对沟内混合液的混合效果、溶解氧浓度分布、污泥沉积、最终处理效果及能耗均产生重要影响^[3] . 曝气转盘是 Orbal 氧化沟的专用曝气装置 ,它起着充氧、混合、推动水流作循环流动和防止活性污泥沉淀等作用^[4] . 曝气转盘的推动使氧化沟内水流与典型明渠中的主要由重力作用形成的流动不同 ,故将氧化沟内的水流定义为非典型明渠水流 . 目前国内对氧化沟流场的认识仍基于典型明渠理论^[5] ,对氧化沟流场的研究还不够细致 ,研究成果与典型明渠紊流理论有一定差距 . 本文通过对氧化沟直道曝气转盘上、下游流场的实验 ,研究了氧化沟的水力特性 ,为实际工程运行中改善氧化沟的水力混合效果 ,防止污泥沉积等提供参考 .

1 实验设备及测量方法

1.1 实验模型

氧化沟模型由矩形断面的环形沟渠与 2 个曝气转盘组成 . 沟宽 30 cm ,直道长 243 cm ,弯道处 $R = 93.5$ cm ,有效水深 28 cm ,如图 1、2 所示 . 曝气转盘由 12 片盘片组成 ,转盘直径 15 cm ,吃水深度 5 cm .

1.2 量测仪器

采用美国 Sontek 公司生产的三维声学多普勒测速仪(ADV)进行量测 ,该仪器可以量测瞬时三维速度 ,并可直接获得紊动参数 ,对水流干扰小、量测精度高、操作简便且流速资料后处理功能强^[6] .

1.3 实验量测方法

量测断面布置如图 1 所示 ,1 号转盘所在直道为第 1 直道 ,2 号转盘所在直道为第 2 直道 . 在第 2 直道转盘上游布置量测断面 11~13 ,下游布置量测断面 14~16 ,断面编号如图 1 所示 . 为分析断面流速分布 ,每个断面布置 5 根垂线 (如图 2) :由氧化沟外侧向内侧依次编号为 1、2、3、4、5 ,其中 3 号垂线为中垂线 ,垂线上每隔 1 cm 左右设置一个测点 .

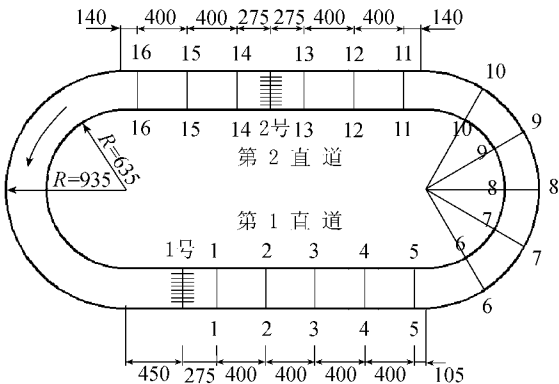


图 1 测量断面分布 (单位 :mm)

Fig. 1 Distribution of measuring profiles (unit : mm)

1.4 实验工况

实验工况为同时开启1号转盘、2号转盘,测量断面1~16的流速分布.本文主要研究第2直道断面11~16的流速分布特点.

2 实验成果及分析

2.1 流速沿垂向分布

根据垂线流速分布,典型明渠流可分为内区($y/H < 0.2$)和外区($y/H > 0.2$)^[7].内区包括黏性底层、过渡区和对数区.内区流速分布符合对数律^[8-9]:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C$$

(1) 图2 测流垂线示意图(单位:mm)

其中

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

式中 u_* ——摩阻流速; τ_0 ——壁面切应力; ρ ——水的密度; κ ——卡门系数; C ——常数.外区用尾流函数对对数公式进行修正.另有研究认为,对数律适用于整个水深,流速分布公式也可用式(2)表示^[10]:

$$\frac{u}{\bar{u}} = A \lg(1000\eta) + B$$

(2)

其中

$$\eta = y/H$$

式中: u ——纵向流速; $\bar{u}$ ——垂线平均流速; y ——测点到渠底距离; H ——水深; A 、 B ——待定系数,由试验数据决定.对于光滑壁面明渠, A 、 B 可分别取为0.2736和0.31^[10].对二维明渠中充分发展紊流,其速度分布沿程不变.

氧化沟内第2直道垂线2~4流速分布如图3所示,包含了6个断面的速度分布.垂线1、垂线5流速分布如图4所示.第2直道由于受上游弯道来流影响,靠近氧化沟两侧壁面的垂线1、垂线5流速分布与垂线2~4流速分布稍有差别.本文将沟内水流视为二维流动,故公式拟合时未采用1号、5号垂线数据.为方便观察和分析,将图3(a)断面11~13数据的横坐标依次增加0.5,图3(b)作相同处理.

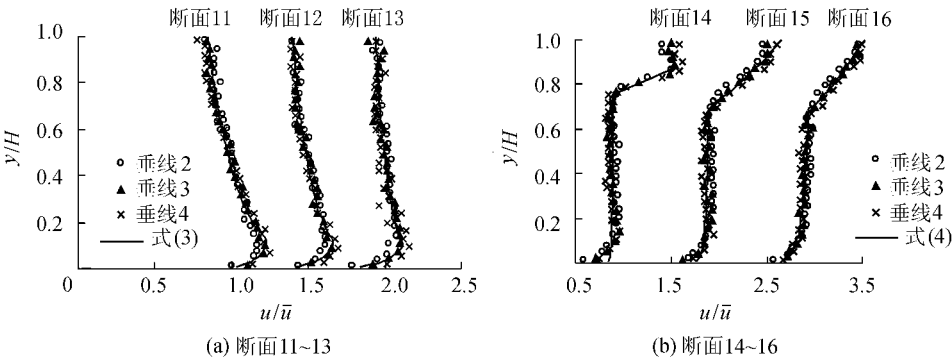


图3 垂线2~4流速分布

Fig. 3 Distribution of velocities for lines 2 to 4

图3表明:曝气转盘上游断面11~13垂线流速分布与曝气转盘下游断面14~16垂线流速分布明显不同,断面11~13流速上部小,下部大;断面14~16流速上部大,下部小.

液流经过弯道时,水流的惯性对凹壁产生冲击,凹壁对水流施加反力,迫使大部分的表面液流在弯道壁的导流作用下沿凹壁向底部扩散,造成水流速度的重新分布.经过碰撞后,表面流速明显减小.因此,断面11~13表层流速较低,沿垂向,随着 y/H 减小,流速逐渐增大,在渠底附近约 $y/H = 0.1$ 处流速出现拐点.以此为界限,将 $y/H > 0.1$ 处定义为外区, $y/H \leq 0.1$ 处定义为内区.外区流速随着 y/H 增大而逐渐减小;内区流速随着 y/H 增大而逐渐增大.沿流向,断面11~13距弯道出口距离逐渐增大,受弯道出流影响逐渐减弱,垂线流速分布逐渐均匀.

用式(3)对断面11~13垂线流速进行拟合,得到系数见表1.系数沿流向呈线性变化,如图5所示.

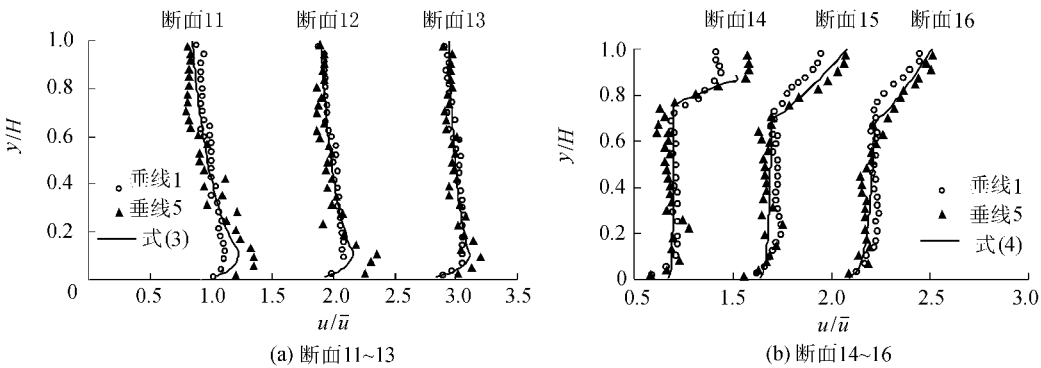


图 4 垂线 1 5 流速分布

Fig. 4 Distribution of velocities for lines 1 and 5

$$\frac{u}{\bar{u}} = \begin{cases} A_1 \lg(1000\eta) + B_1 & (0 < \eta \leq 0.1 \text{ 内区}) \\ A_2 \ln \eta + B_2 & (0.1 < \eta < 1 \text{ 外区}) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$A_1 = 0.0309\left(\frac{x}{H}\right) + 0.3109 \quad B_1 = -0.0994\left(\frac{x}{H}\right) + 0.4579$$
$$A_2 = 0.036\left(\frac{x}{H}\right) - 0.0415 \quad B_2 = 0.0332\left(\frac{x}{H}\right) + 0.9754$$

式中: x ——断面距转盘中轴距离; x/H ——断面距转盘中轴相对距离, 以转盘位置作为原点, 转盘上游断面 11~13 的 x/H 定义为负值, 转盘下游断面 14~16 的 x/H 定义为正值; η ——分区界限距渠底相对高度。

表 1 式(3)系数

Table 1 Coefficients of Eq.(3)

断面	A_1	B_1	A_2	B_2	η
11	0.193	0.843	-0.183	0.846	0.10
12	0.233	0.697	-0.125	0.897	0.10
13	0.282	0.557	-0.079	0.945	0.10

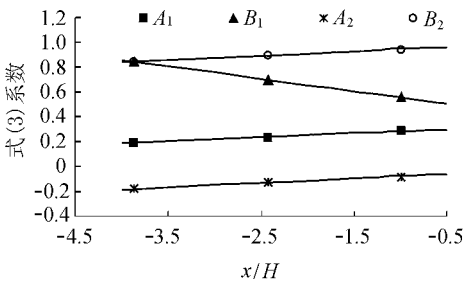


图 5 式(3)系数沿程变化

Fig. 5 Variation of coefficients of Eq.(3) along flows

位于转盘下游的断面 14~16 垂线流速分布较转盘上游各断面流速分布发生明显变化, 上部水流受到曝气转盘推动, 速度明显增大, 且出现峰值, 与下部水流形成流速差, 将其定义为外区; 沟内下部流速及流速梯度较小, 未受到转盘推力的影响, 将其定义为内区。沿流向各断面内区流速逐渐增大, 外区流速逐渐减小, 垂线流速分布趋于均匀。对断面 14~16 内区和外区分别用文献 [10] 中式(1)进行拟合, 得到式(4), 为第 2 直道转盘下游断面流速沿垂线分布的统一表达式。式(4)中的系数及分区界限见表 2, 系数沿流向呈对数变化, 如图 6 所示。由图 3(b)可知, 断面 14~16 内区速度沿垂线分布与典型明渠形态相似, 外区流速分布与典型明渠明显不同。

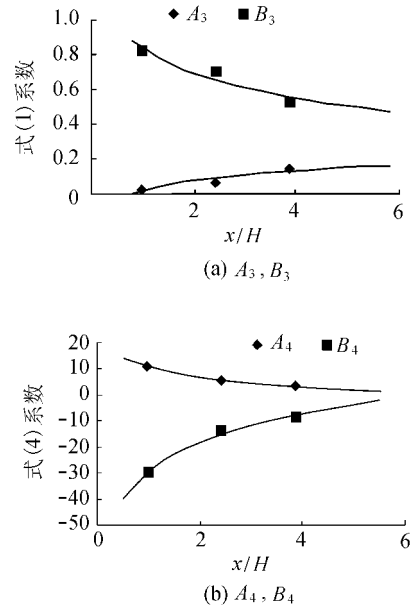


图 6 式(4)系数沿程变化

Fig. 6 Variation of coefficients of Eq.(4) along flows

$$\frac{u}{\bar{u}} = \begin{cases} A_3 \lg(1000\eta) + B_3 & (0 < \eta \leq \eta_0 \text{ 内区}) \\ A_4 \lg(1000\eta) + B_4 & (\eta_0 < \eta < 1 \text{ 外区}) \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$A_3 = 0.0817 \ln \frac{x}{H} + 0.0202 \quad B_3 = -0.2058 \ln \frac{x}{H} + 0.8364$$

$$A_4 = -5.428 \ln \frac{x}{H} + 10.397 \quad B_4 = 15.799 \ln \frac{x}{H} - 29.048$$

本文实验条件下, 第 2 直道内, 曝气转盘上游流速分布规律符合式(3), 下游流速分布规律符合式(4), 曝气转盘的推动对上游流速分布影响不大, 当转盘吃水深度改变时对下游流速分区界限会产生一定影响。

2.2 流速沿横向分布

第2直道各断面流速沿横向分布如图7所示,垂线方向选定5个深度,用以表征不同深度处流速沿横向的分布.图中横坐标为相对距离 l/B ,其中, l 为垂线距沟外侧边壁的距离, B 为渠宽.纵坐标为相对流速 u/V , V 为断面平均流速.图7表明:

- a. 转盘上游断面11~13垂线流速上部小,下部大,沿流向,从断面11至断面13流动变化过程中,上部流速逐渐增大,下部流速逐渐减小,5个深度处流速差别逐渐减小.
- b. 转盘上游断面11~13外区($y/H=0.95, 0.75, 0.50, 0.25$)横向流速分布明显不均匀,外侧(靠近 $l/B=0$ 处)流速大,内侧(靠近 $l/B=1$ 处)流速小,在流速较低的内侧附近很容易出现污泥沉积;内区($y/H=0.05$)横向流速分布较为均匀,这与典型明渠^[11]中弯道出流的流态相似.
- c. 转盘下游断面14~16由于表面水流受到转盘的均匀推动,使 $y/H=0.95$ 深度处流速最大且沿横向分布均匀,随着 y/H 减小,速度逐渐降低,沿流向,从断面14至断面16流动变化过程中,高速的表面液流逐渐向中、下部扩散,使上部流速逐渐减小,中、下部流速逐渐增大.

表2 式(4)系数

Table 2 Coefficients of Eq. (4)

断面	A_3	B_3	A_4	B_4	η
14	0.028	0.822	10.620	-29.692	0.75
15	0.068	0.704	5.101	-13.650	0.69
16	0.147	0.525	3.373	-8.591	0.67

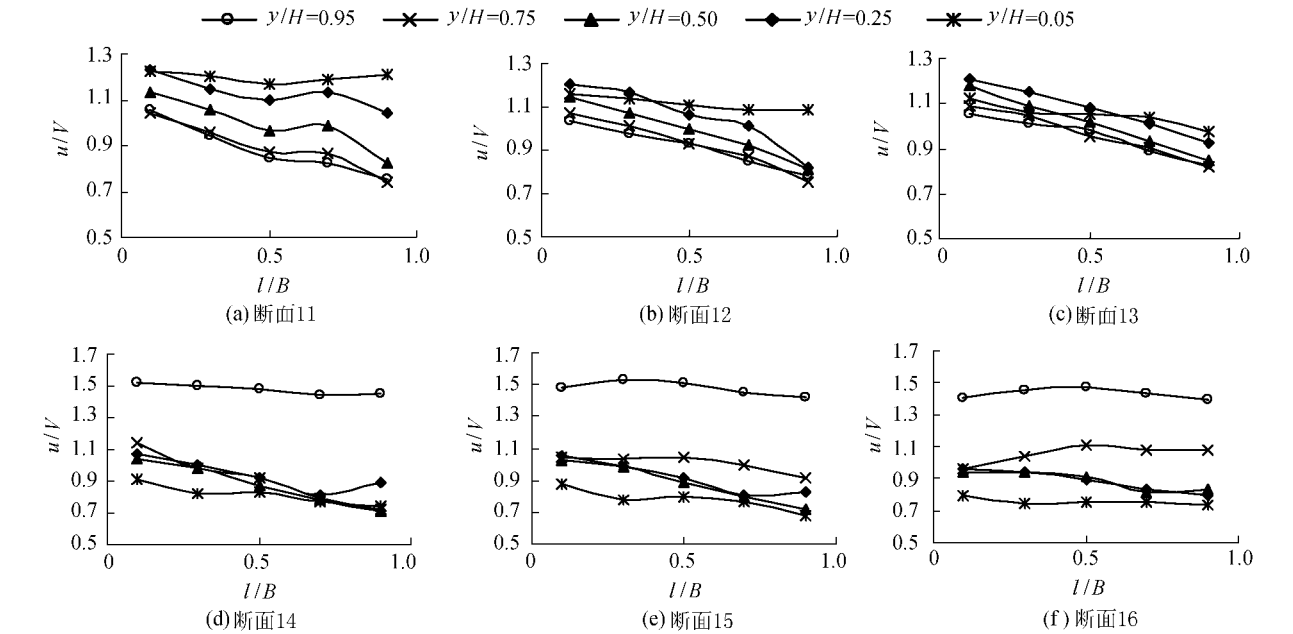


图7 流速沿横向分布

Fig. 7 Distribution of velocities along lateral direction

位于转盘上游的断面11~13流速沿横向分布不均,主要是由于断面11~13距离弯道较近,受弯道影响较大.水流在弯道流动过程中产生了断面环流^[12],三维方向的流速均发生改变,上层水体流向凹岸,下层水体流向凸岸做横向旋转运动,高速液流多集中于弯道外侧,形成弯道越靠外壁流速越大,内壁则呈停滞回旋状态,使内外侧流速差逐渐增大^[13].液流在出弯后一定距离内最大流仍然靠近外侧.位于转盘下游的断面14~16水流主要受转盘推力影响,形成自由剪切射流与典型明渠流动的混合流.此时,弯道出流的不均匀性随着断面距弯道出口距离的增加而大大减弱,对下游断面的影响已居于次要地位,此时断面流速分布主要受转盘推动影响.

根据对第2直道转盘上游、下游的水流流态对比可知:曝气转盘前后断面的流速沿垂线、横向分布特征均不同,垂线流速的公式描述及内外分区界限均发生显著变化.这种差异主要是由曝气转盘对水流提供了局部推动力造成的.

3 结 论

- a. 氧化沟第2直段内,位于曝气转盘上游和下游断面的流速沿垂线分布、横向分布、内外分区界限及沿程变化规律均不同,这说明,由曝气转盘对水流提供的局部动力对水流的水力特性产生很大影响.

断面 11~13 垂线流速分布规律符合式(3)。垂线流速以 $y/H=0.1$ 为界,分为内区和外区。外区流速随着 y 的增大而逐渐减小,横向流速分布明显不均匀,且沟外侧流速明显大于沟内侧流速,在流速较低的内侧附近很容易出现污泥沉积;内区横向流速分布较为均匀。断面 11~13 受曝气转盘影响较小,其流态与典型明渠中弯道出流的流态相似。

b. 断面 14~16 垂线流速分布规律符合式(4)。式(4)与典型明渠文献[10]中公式形式一致,但系数不同。断面 14~16 内区流速沿垂线分布与典型明渠形态相似,外区垂线流速分布与典型明渠明显不同。沿流向,从断面 14 至断面 16 流动变化过程中,高速的表面液流逐渐向中、下部扩散,使上部流速逐渐减小,中、下部流速逐渐增大。

参考文献:

- [1] 袁忠伟,孙力平,于静洁,等.改进型氧化沟的水力流态特性及其脱氮除磷效果[J].中国给水排水,2009,25(1):89-92.
(YUAN Zhong-wei, SUN Li-ping, YU Jing-jie, et al. Hydraulic flow characteristics and removal effect of nitrogen and phosphorus in modified oxidation ditch[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(1):89-92. (in Chinese))
- [2] 邓荣森,况力,李媛,等.Orbal 氧化沟混合液流态试验研究[J].重庆建筑大学学报,2007,29(2):86-89. (DENG Rong-sen, KUANG Li, LI Yuan, et al. Research and experiment on mixed liquor of orbal oxidation ditch[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(2):86-89. (in Chinese))
- [3] XIA Shi-bin, LIU Jun-xin. An innovative integrated oxidation ditch with vertical circle for domestic wastewater treatment[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(9):1111-1117.
- [4] 韩志强,白振光,刘家勇.氧化沟工艺曝气设备的技术现状[J].舰船防化,2007(6):10-44. (HAN Zhi-qiang, BAI Zhen-guang, LIU Jia-yong. The development status of aerator in the oxidation ditch[J]. Chemical Defence on Ships, 2007(6):10-44. (in Chinese))
- [5] 邓荣森.氧化沟污水处理理论与技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [6] 肖洋,唐洪武,毛野,等.新型声学多普勒流速仪及其应用[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(3):15-18. (XIAO Yang, TANG Hong-wu, MAO Ye, et al. New Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) and its application[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2002, 30(3):15-18. (in Chinese))
- [7] 章梓雄,董曾南.粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,1998:428-438.
- [8] SARMA K V N, LAKSHINARAYANA P, RAO N S L. Velocity distribution in smooth rectangular open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(2):270-289.
- [9] NEZU I, NAKAGAWA H. Turbulence in open-channel flow[M]. Rotterdam: A A BALKEMA, 1993:15-24.
- [10] 何建京,王惠民.光滑壁面明渠非均匀流水力特性[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):513-517. (HE Jian-jing, WANG Hui-min. Turbulence characteristics of non-uniform flow in a smooth open channel[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2003, 31(5):513-517. (in Chinese))
- [10] 刘焕芳.弯道纵向垂线平均流速的分布[J].泥沙研究,1992(4):24-34. (LIU Huan-fang. The distribution of depth-averaged longitudinal velocity in channel bend[J]. Journal of Sediment Research, 1992(4):24-34. (in Chinese))
- [11] 孙东坡,朱岐武,张耀先,等.弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J].水科学进展,2006,17(1):61-66. (SUN Dong-po, ZHU Qi-wu, ZHANG Yao-xian, et al. Study of circulating velocity profile and lateral sediment transport in curved channels[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1):61-66. (in Chinese))
- [12] 尚应奇.深沟转刷型一体化氧化沟水力特性试验研究[D].成都:西南交通大学,2004.

Characteristics of flow fields in oxidation ditches under action of aeration turntables

LI Zhi-jie, HE Jian-jing, XU Yan, SONG Huai-hui

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The acoustic Doppler velocimeter (ADV) was employed to measure the velocity fields in the model for oxidation ditches under the simultaneous running of aeration turntables No. 1 and No. 2. By fitting the measured data, a mathematical expression for the distribution laws of upstream and downstream velocities of the aeration turntables in the straight way No. 2 of the oxidation ditches was acquired. The results show that the variation laws of upstream and downstream velocities of the aeration turntables along the vertical and lateral directions, the district boundaries and the flows are different. The hydraulic characteristics in the upstream of the aeration turntables are similar to those of discharge flows in typically curved bend in open channels. While the hydraulic characteristics in the downstream of the aeration turntables are significantly different from those in typical open channels.

Key words: oxidation ditch; ADV; aeration turntable; velocity distribution; typical open channel flow