

文章编号: 2097-096X(2025)02-0173-11

## 基于尾流函数的明渠流量计算方法研究

刘建丽<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2</sup>, 白美健<sup>1,2</sup>, 张宝忠<sup>1,2</sup>, 邵帅超<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 断面平均流速的合理表征是明渠水流精准计量的关键, 针对通过加密测点获取断面平均流速耗时耗力的问题, 本文提出了一种基于尾流交点流速表征断面平均流速的明渠流量计算方法。本文在山东省水资源计量装备产业计量测试中心可变渠检测系统开展试验, 设置了 0.5、1.0 两个边坡系数和 0.42、0.83、1.56 和 2.03 m<sup>3</sup>/s 四个流量梯度共 8 组试验, 研究不同组合下断面流速分布规律, 利用尾流函数拟合了中垂线流速数据, 提出了断面测流的点面转换法, 分析了标准规范法和点面转换法的测流误差, 并在石津灌区干渠开展应用。结果表明, 对于宽浅型明渠最大流速发生在中垂线水面, 不同尾流强度系数的实测流速拟合曲线交于一点, 不同组合下尾流交点流速与断面平均流速呈较好的线性关系, 采用点面流速转换关系的流量计算误差小于 3.32%, 满足标准规范法要求; 点面转换法在河北石津灌区渠首测站得到了较好的应用, 测流误差小于 3.10%, 与标准规范法相比测点减少了 40% 以上。研究表明点面转换法在保证测流精度的同时可显著减少测点数量, 对提高灌区测流效率具有较高的实用价值。

**关键词:** 明渠; 流速分布; 尾流函数; 流速面积法

**中图分类号:** S274.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240128

### 1 研究背景

精准计量是科学管理灌溉用水的前提条件, 是当前灌区现代化建设的重要内容之一<sup>[1]</sup>。明渠作为灌区的主要输水方式, 其引水流量的精准测量备受国内外学者关注, 明渠测流主要包括水工建筑物量水、堰槽量水和仪器仪表量水<sup>[2]</sup>。随着电子和信息技术的迅猛发展, 仪器仪表量水已被广泛应用, 通过仪器仪表测得点或线流速, 根据实测数据将点或线流速转换为断面平均流速, 采用流速面积法计算断面流量, 因此研究断面流速分布规律、明晰点面流速转换关系, 对提高明渠流量测量精度、实现灌区用水可持续发展具有重要意义。

近年来相关学者针对明渠流量计算方法开展了大量研究。邓数学等<sup>[3]</sup>提出的水深-流速-流量法、左建等<sup>[4]</sup>提出的多垂线法、刘德斌等<sup>[5]</sup>提出的库容法均有效实现了对渠道流量的精确计算, 但是不适用于复杂流态, 对于不规则断面的大型渠道或河道测流工作量极大。范恬等<sup>[6]</sup>基于圆柱绕流模型和流速面积法, 提出了利用横向摆杆式测流装置进行测流的新方法, 可精确计算断面流量、提高了测流便捷性, 但该方法需较多测点流速为基础; 戚玉彬<sup>[7]</sup>应用能量方程式推求了流量的理论公式, 基于量纲分析法分别建立不包含和包含渠道底坡的流量公式, 但仅适用于底坡小于 1/1200 的渠道; 周和平等<sup>[8]</sup>对水深小于 1 m、水面宽度小于 5 m 的不同类型渠道用流速仪进行测量, 应用经验法测量单点中垂线 0.633h 处流速, 流量计算误差均在 5% 以内, 但仅适用于断面规则水流较稳的中小型渠道标准断面; 刘鸿涛等<sup>[9]</sup>用声学多普勒剖面流速仪进行流速、断面面积的测定, 应用渠道中垂线 0.36h 处流速作为断面平均流速, 使用流速面积法得到渠道计算流量, 测流误差小于 5%, 但不适用于不同宽深比的渠道。王宝贺等<sup>[10]</sup>提出基于水面一点法的非接触式流量计算方法, 有效解决了传统流速仪测流难度

收稿日期: 2024-07-29; 网络首发时间: 2024-12-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241216.1706.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1900804); 中国水利水电科学研究院创新团队项目(ID0145B042021)

作者简介: 刘建丽(1998-), 硕士生, 主要从事灌区量测水研究。E-mail: 1185789284@qq.com

通信作者: 张凯(1990-), 高级工程师, 主要从事灌区用水管理和节水灌溉技术研究。E-mail: zhangkai@iwhr.com

大的问题，但精度不高；李效贤<sup>[11]</sup>于广东省东深供水工程渠首太园泵站，首次针对大型渠道，进行了超声波流量计测流与流速仪测流对比试验，结果表明超声波流量计与流速仪测流具有相同等级测量精度。但非接触式测流设备使用高精度的光学、电子元器件，价格较高并且需要定期维护和保养，对安装和使用环境也有要求。部分学者将数学模型及粗糙系数等参数应用到灌区测流也取得了较好的结果。袁德忠等<sup>[12]</sup>针对常用量测水技术构建的网格单元与断面平均流速关系无法准确推求流量这一问题，提出利用 H-ADCP 对测得的各单元流速，建立与传统量测水技术测得的断面流速之间的关系，基于机器学习构建了支持向量机、BP 神经网络模型、极限学习机 3 种机器学习模型，对 8 种网格单元分配方案进行了模拟。其中，BP 神经网络模型效果最好，但对于高频分量的预测精度较低<sup>[13]</sup>。

综上，在保证测流精度的同时提出一种便捷的流量计算方法是十分必要的<sup>[14]</sup>。本文以山东省水资源计量装备产业计量测试中心实测数据为基础，运用 Coles 尾流函数<sup>[15]</sup>拟合了中垂线流速数据，提出了基于尾流交点流速表征断面平均流速的明渠流量计算方法，与多种简单易行的流量计算方法相比误差较小，并在石津灌区渠首测站进行应用，有效提高了灌区测流效率。

## 2 材料与方方法

**2.1 室内试验设计** 明渠断面流量试验于 2023 年 4 月在山东省水资源计量装备产业计量测试中心开展，测试中心可变渠检测系统由动力系统、储水系统、检测系统、回水系统等组成，渠道长 72 m，底宽 3.8 m，边壁高 2 m，均采用镀锌铁板，糙率为 0.06，纵坡为 4/1000，渠道边坡、流量可进行调节，边坡调节范围 0.5~1.0，流量调节范围 0.01~2.78 m<sup>3</sup>/s，见图 1。

根据测试中心条件设置边坡和流量为影响因素，边坡系数设置 0.5 和 1.0 两个水平，流量设置 0.42、0.83、1.56 和 2.03 m<sup>3</sup>/s 四个水平，采用全排列组合设计室内试验共计 8 组。采用转子流速仪（型号：LS1206B；测量范围：0.005~2 m/s；准确度等级：0.04% $v$ +0.002 m/s）在渠道中部（即 36 m 处）监测断面流速分布，断面测点分布参照《速度-面积法流量装置》（JJG 835—1993）和《灌溉渠道系统量水规范》（GB/T 21303—2017）有关规定，保证测点密度可以准确反映流速分布特征值。在渠道断面中心至坡脚区域共设 11 条测线，中心区域测线间距为  $B/10$ （ $B$  为底宽），边壁区域测线间距为  $b/3$ （ $b$  为边壁区域水面宽），每条测线分别在水面以下 5 cm、0.2 $h$ 、0.4 $h$ 、0.6 $h$ 、0.8 $h$ 、渠底以上 5 cm 处布置测速点（ $h$  为水深）；在渠道坡脚至边壁区域根据实际水深设置 1~3 条测线，断面测点布置见图 2。每个测点监测历时 180 s，重复 3 次取平均值作为该测点流速。



图 1 室内可变渠系统

Fig.1 Indoor variable drainage system

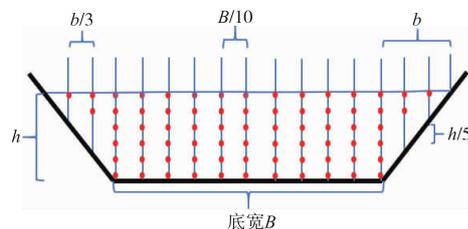


图 2 室内试验测点位置布设图

Fig.2 Schematic diagram of indoor experimental test point layout

**2.2 野外试验设计** 野外试验于 2024 年 4 月在石津灌区渠首站进行，渠首站渠道断面为梯形，底宽 14 m，边坡系数为 2，渠底坡降 1/1600。测流断面选在渠首站断面规则、水流均匀、不受建筑物泄流影响的顺直渠段（见图 3），根据现场条件设置流量为影响因素，设置 45、63、68、70、80 m<sup>3</sup>/s 五个水平，每个水平测量 3 次重复，共计 5 组试验。采用转子流速仪监测断面流速分布，在渠道断面中心区域共设 7 条测线，每条测线分别在水面以下 10 cm、0.2 $h$ 、0.4 $h$ 、0.6 $h$ 、0.8 $h$ 、渠底处布置测速点（ $h$  为水深）；在渠道坡脚向边壁方向 3 m 处设置 1 条测线，断面测点布置见图 4。

室内和野外试验渠道的实测水流参数见表 1。



图3 石津灌区渠首测站

Fig.3 Shijin irrigation district canal head measurement station

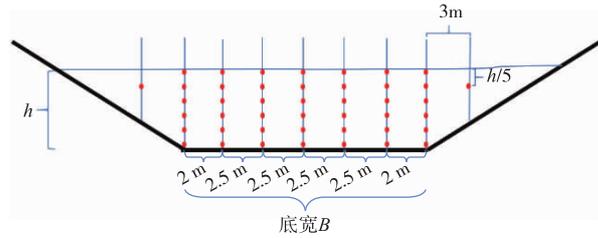


图4 野外试验测点位置布设图

Fig.4 Figure of field experiment test point layout

表1 渠道实测水流参数

Table 1 Measured water flow parameters of the channel

试验设置	断面形状	边坡系数	流量 $Q/(m^3/s)$	水深 $h/m$	水面宽 $B'/m$	断面面积 $A/m^2$	水力半径 $R/m$	断面平均流速 $\bar{u}/(m/s)$
室内	梯形	0.5	0.42	0.80	4.60	3.36	0.60	0.128
			0.83	0.90	4.70	3.81	0.66	0.223
			1.56	1.06	4.86	4.59	0.74	0.338
			2.03	1.09	4.89	4.75	0.76	0.427
	1	0.42	0.78	5.42	3.73	0.61	0.110	
		0.83	0.84	5.48	3.91	0.63	0.205	
		1.56	0.98	5.76	4.68	0.71	0.346	
		2.03	1.01	5.81	4.84	0.73	0.419	
野外	梯形	2	18.86	0.95	17.80	15.11	0.83	1.248
			45.85	1.44	19.76	24.31	1.19	1.886
			63.90	1.79	21.16	31.47	1.43	2.031
			71.40	1.92	21.68	34.25	1.52	2.084
			79.22	2.09	22.36	38.00	4.07	2.085

### 2.3 明渠流速分布模型

2.3.1 Coles 尾流函数 垂向流速分布曲线符合对数函数分布，但由于侧壁及空气的影响产生二次流，最大流速点出现于水面以下，使得垂线上一定存在着流速值相同的两点，导致垂向流速分布按照对数函数拟合具有一定偏差，因此运用 Coles 的尾流函数<sup>[15]</sup>进行修正如下：

$$\omega\left(\frac{y}{h}\right) = 2 \frac{\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{h}\right) \quad (1)$$

进而将流速沿垂向分布表示为对数律与尾流函数的线性组合如下：

$$\frac{u}{u_*} = A \log\left(\frac{u_* y}{\nu}\right) + B + 2 \frac{\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{h}\right) \quad (2)$$

式中： $\nu$ 为运动黏性系数，取  $1.006 \times 10^{-6} m^2/s$ ； $u_*$ 为摩阻流速，m/s； $k$ 为卡门常数，取 0.41； $\Pi$ 为尾流强度系数，分别取  $\Pi=0, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.5$ ； $h$ 为水深，m； $u$ 为测点流速，m/s； $y$ 为测点水深，m； $A, B$ 为待定系数。

2.3.2 摩阻流速确定方法 试验中保持水面坡度和水槽纵坡一致，保证均匀流状态，由于转子流速仪无法测到近壁区和黏性底层的流速，因此本文根据均匀明渠流的阻力平衡求摩阻流速<sup>[16]</sup>，该方法需要精确地量测渠道的纵坡和水面坡度。考虑边壁影响后得出的摩阻流速计算公式如下：

$$u_* = \sqrt{ghJ} \quad (3)$$

式中  $J$  为水力坡度。

2.4 流量计算误差分析方法 为验证点流速表征断面平均流速的流量计算方法精度，本文在标准规范

法的基础上加密测点，采用流速面积法计算断面流量(简称为详测法)，将该流量作为“断面流量真值”，对比了标准规范法、水面一点法与本文提出的点面转换法计算流量的误差，采用相对误差表示不同流量计算方法的精度。

#### 2.4.1 流量计算方法

(1)详测法。将梯形渠道断面划分为中间矩形区域和边坡三角区域，矩形区域按  $B/10$  测线间距共设 11 条测线，每条测线分别在水面以下 5 cm、 $0.2h$ 、 $0.4h$ 、 $0.6h$ 、 $0.8h$ 、渠底以上 5 cm 处布置 6 个测速点( $h$  为水深)，共计 66 个测点；在渠道坡脚至边壁区域根据实际水深布置 2~10 个测点不等。本次试验断面计算采用了 68~76 个测点流速数据进行流量计算，单元格面积计算如图 5(a)：以渠道底宽确定中间区域单元格宽  $b_i$ ，以水面宽度和水平移动测距确定边坡区域单元格宽，以竖直移动测距和水深共同确定单元格高  $h_i$ ，流量计算公式如下：

$$Q = \sum_{i=1}^n S_i U_i \quad (4)$$

式中： $S_i$  为每个单元格的面积， $m^2$ ； $U_i$  为每个单元格的测点流速， $m/s$ 。

(2)标准规范法。根据《灌溉渠道系统量水规范》(GB/T 21303—2017)有关规定，室内试验梯形渠道断面边坡 0.5 水平下，水深小于 1 m、水面宽度为 4.6~4.89 m，按二点七垂法计算；边坡 1 水平下，水深小于 1m、水面宽度为 5.42~5.81 m，按二点五垂法计算，单元格面积如图 5(b)。田间试验军一支梯形渠道断面水深大于 1 m、水面宽度为 19.76~22.32 m，按三点五垂法计算流量，流量计算公式如下：

$$Q = q_{0,1} + q_{1,2} + q_{2,3} + \dots + q_{n,n+1} \quad (5)$$

式中： $q_{i-1,i} = U_{i-1,i} \times A_{i-1,i}$ ； $A_{i-1,i} = h \times (b_{i-1} + b_i) / 2$ ； $A_{i-1,i}$  为第  $i-1$  和第  $i$  条两条垂线间的面积， $m^2$ ； $U_{i-1,i}$  为第  $i-1$  和第  $i$  条两条垂线间的流速， $m/s$ ； $q_{i-1,i}$  为第  $i-1$  和第  $i$  条两条垂线间的流量， $m^3/s$ 。

(3)水面一点法。根据 Hauet<sup>[17]</sup> 提出的基于水面一点法的明渠流量计算方法，垂面平均流速转换方法如式(6)，单元格面积如图 5(c)，流量计算公式同标准规范法相同。

$$u_m = 0.9u_i \quad (6)$$

式中： $u_m$  为垂线平均流速， $m/s$ ； $u_i$  为垂线水面流速， $m/s$ 。

(4)点面转换法。将中垂线靠近水面处、 $0.2h$ 、 $0.4h$ 、 $0.6h$ 、 $0.8h$ 、渠底处点流速数据与尾流函数进行拟合可得尾流交点流速和断面平均流速的线性关系，单元格面积如图 5(d)，流量计算公式同标准规范法相同。

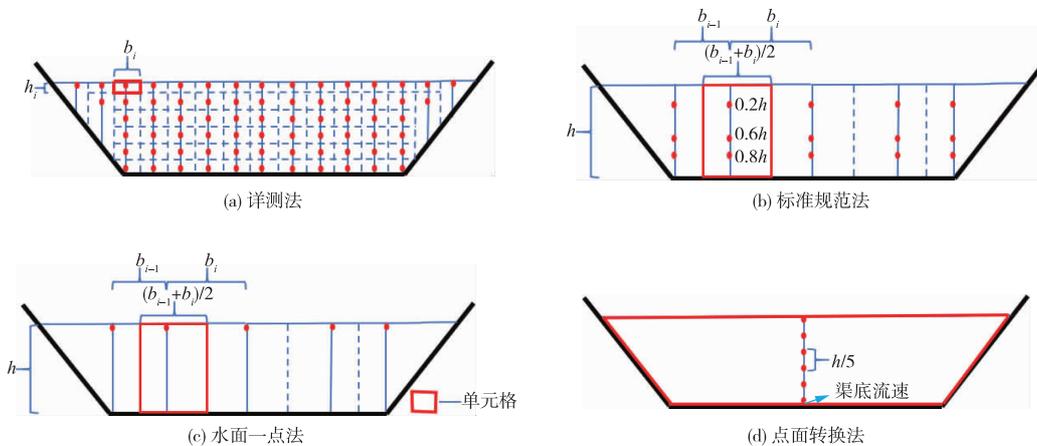


图 5 不同方法流速点表征面积示意图

Fig.5 Schematic diagram of different methods velocity point area representation

2.4.2 流量计算精度评价指标 采用相对误差  $r$  作为流量计算精度评价指标：

$$r = \frac{|Q_{\text{计算}} - Q_{\text{详测法}}|}{Q_{\text{详测法}}} \quad (7)$$

式中： $Q_{\text{详测法}}$  为详测法计算的断面流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ，将该流量作为“断面流量真值”； $Q_{\text{计算}}$  为其余不同方法计算的断面流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 3 结果与分析

**3.1 断面流速分布规律** 为直观地表示梯形渠道过水断面上的流速分布规律，根据实测流速资料，图 6 绘出 8 种工况下测流断面的流速等值线图。从图中可以看出，渠道中垂线两侧的流速值对称相等，且因边床阻力大于自由水面阻力最大流速发生在中垂线上，靠近边壁由于边壁糙率的影响，断面上产生副流导致断面上流体发生横向交换，使垂线最大流速点的位置下降<sup>[18-21]</sup>。靠近坡脚流速较小，因内区壁面湍流受床面控制底层流速分布显著低于其他各层，接近边壁处的等流速线图近似于边壁轮廓。随着流量增大，水深抬升，断面平均流速逐渐增大，边壁附近的流速变化大，中心区则变化相对较小，各垂线流速分布区分逐渐明显。随着边坡系数从 0.5 增大到 1，水深略微下降(5 cm 内)但变化不明显，整体流速略微减小，过水断面的边壁区域面积增大，在边壁区域附近时，侧壁对水流影响较大从而使得该区域内的流速在减小，流速变化最为明显的位置出现在水面处，等值线图上可以看出边坡增大，渠道中部流速向两边“扩散”。

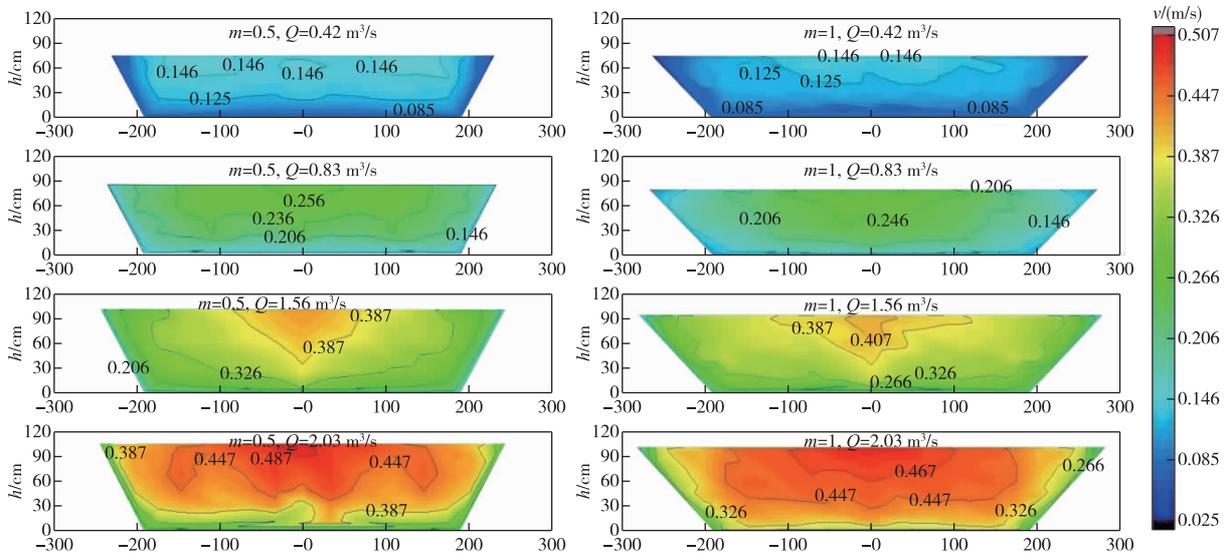


图 6 明渠断面流速等值线图

Fig.6 Flow velocity contour plot

**3.2 特征点位置分析** 断面平均流速的合理表征可以为简化和精确测量渠道流量提供理论依据，以便在实践中能够得到应用。根据 1956 年 Coles 提出二维不可压缩紊流边界层流动的流速分布可以表示为对数律和尾流律的线性组合见式(2)，引入  $u_+ = \frac{u}{u_*} + \frac{\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right)$  为纵轴， $y_+ = \log\left(\frac{u_* y}{\nu}\right)$  为横轴对各组中垂线流速进行拟合。图 7 给出了不同流量、不同边坡条件下的相对流速与相对水深间的拟合曲线。由图 7 可以看出，不同流量、边坡及尾流强度下，相对流速与相对水深呈线性关系，相关系数在 0.809 以上，且各组合的拟合曲线均交于一点。

根据式(2)，拟合曲线交于一点即  $\frac{\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) = 0$ ，此时有两种假设：①  $\sin\left(\frac{\pi y}{2h}\right) = 0$ ，即  $\frac{y}{h} = 0$ ， $y = 0$ 。由边界层理论可知<sup>[22]</sup>，固体边壁渠道中边壁处流速为零，即式(2)左边  $\frac{u}{u_*}$  为 0，公式右边存在  $\log(yu_* / \nu) = -\infty$ ，系数  $B = \infty$ ，这就使方程无法表达边壁处的流速。② 如果交点处尾流强度系数值  $\Pi = 0$ ，则  $\frac{\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) = 0$ ，从图 7 看到  $\Pi = 0$  时的拟合曲线也经过交点，所以交点处尾流强度系数

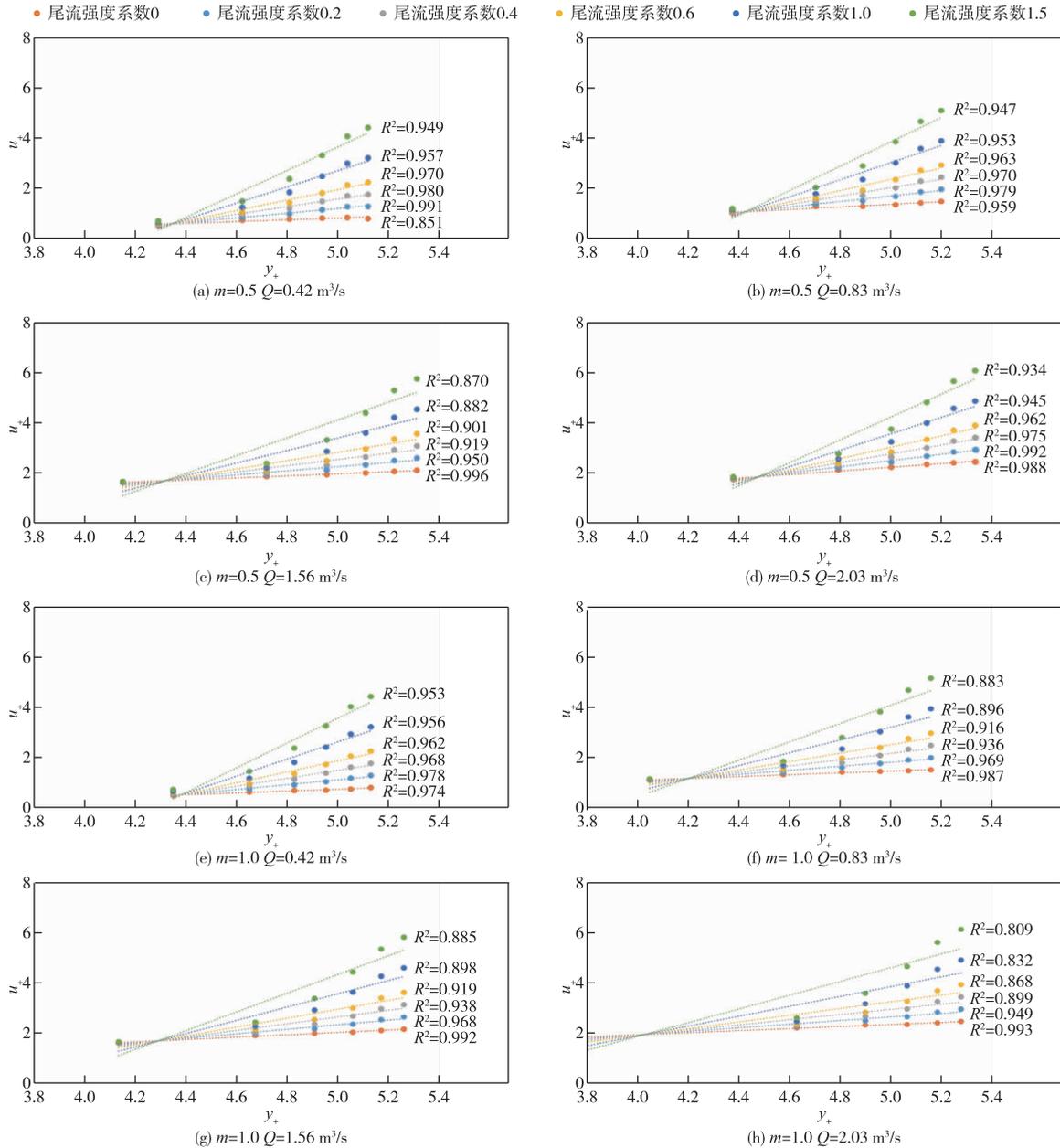


图7 中垂线流速尾流分析图

Fig.7 Analysis of wake flow in the middle perpendicular line

$\Pi=0$  这种情况存在。即同一水力特性条件下，交点处  $\log(yu_* / \nu)$  的值  $C$  为一定值。根据交点值  $C$ ，按照  $y = 10^C \times \nu / u_*$  就可以求得交点处的水深，但  $\Pi=0$  时式(2)为对数形式，本文采用对数尾流函数，遂选取拟合曲线的相关系数第二高的尾流强度值为 0.2，交点水深与水力参数见表 2。在不同的水力特性条件下，交点处水深与测线水深的比例在 0.06~0.18 之间，与渠道流量  $Q$ 、水深  $h$ 、雷诺数  $Re$ 、弗劳德数  $Fr$  无关，这与尹进高等<sup>[23]</sup>的研究结果相符。

**3.3 点面流速转换规律分析** 根据尾流函数(式(2))计算交点流速，交点流速与断面平均流速的相关性如图 8 所示，两者呈较好的线性关系，拟合方差在 0.995 以上。边坡系数 0.5 和 1.0 分别拟合时，边坡系数从 0.5 增加至 1.0 时  $k$  值有增大的趋势、 $b$  值有减小的趋势，其中  $k$  值由 0.998 增大到 1.005， $b$  值由 0.027 减小到 0.019，但总体的变化幅度不大，考虑将不同边坡进行统一拟合来获得该设备的点面流速转换关系。根据不同边坡分别拟合和统一拟合得到的点面转换关系分别计算流量，其相对误差在 0.53%~3.66% 之间，因此交点流速表征断面平均流速的点面转换法是可行的。

表 2 交点水深  $h_0$  与水力参数之间的关系表

Table 2 Relationship table between intersecting water depth  $h_0$  and hydraulic parameters

边坡系数	流量 $Q/(m^3/s)$	$Re$	$Fr$	$y_+$	$u_+$	交点水深 $h_0/m$	相对水深 $h_0/h$	交点流速 $u_0/(m/s)$
0.5	0.42	76480	0.05	4.35	0.60	0.27	0.17	0.100
	0.83	145533	0.08	4.43	1.06	0.30	0.17	0.192
	1.56	235029	0.10	4.32	1.58	0.22	0.10	0.342
	2.03	329925	0.13	4.48	1.94	0.31	0.14	0.376
1.0	0.42	71454	0.04	4.38	0.55	0.14	0.18	0.084
	0.83	128646	0.07	4.20	1.07	0.09	0.11	0.193
	1.56	245035	0.11	4.29	1.72	0.11	0.11	0.335
	2.03	311007	0.13	4.03	1.95	0.06	0.06	0.387

**3.4 误差分析** 以详测法计算的流量为基准, 分别对比标准规范法、水面一点法和点面转换法计算流量的误差, 计算结果见表 3。标准规范法、水面一点法及点面转换法计算渠道流量相对误差分别为 0.13%~3.20%、0.20%~6.84% 和 0.17%~3.32%, 平均误差分别为 2.22%、4.35% 和 2.25%, 综合相对误差和平均误差, 点面转换法与标准规范法测流精度相差不大, 测流精度显著高于水面一点法。根据不同流量下的水面宽度, 标准规范法需 10~15 个测点, 水面一点法需 5~7 个测点, 点面转换法需 6 个测点, 点面转换法相比标准规范法测点数量减少了 40% 以上, 因此点面转换法兼具精准和省工的优势, 适宜在生产实际中采用。

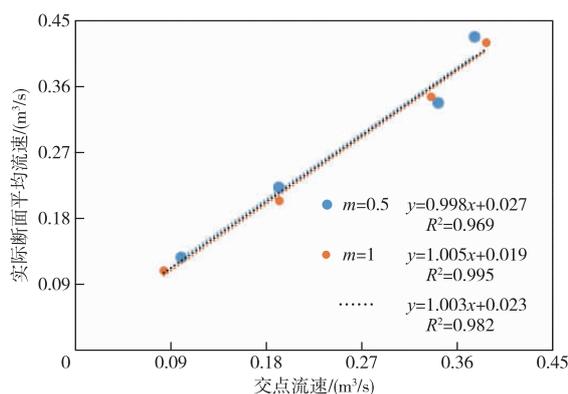


图 8 断面平均流速  $\bar{u}$  与交点流速  $u_0$  的关系图

Fig.8 Relationship between average sectional velocity  $\bar{u}$  and intersection velocity value  $u_0$

表 3 四种方法计算流量误差表

Table 3 Four methods to calculate the flow error table

工况	详测法 $Q/(m^3/s)$	标准规范法 $Q/(m^3/s)$	标准规范法误差	水面一点法 $Q/(m^3/s)$	水面一点法误差	点面转换法 $Q/(m^3/s)$	点面转换法误差
1	0.43	0.45	2.98%	0.43	1.70%	0.43	0.17%
2	0.85	0.86	1.63%	0.82	3.61%	0.83	2.28%
3	1.55	1.55	0.13%	1.49	4.31%	1.57	2.53%
4	2.03	1.98	2.13%	1.90	6.16%	2.01	1.92%
5	0.41	0.42	2.10%	0.41	0.20%	0.40	2.12%
6	0.80	0.78	3.12%	0.76	5.90%	0.81	3.32%
7	1.62	1.57	3.20%	1.52	6.06%	1.65	2.92%
8	2.03	1.97	2.50%	1.89	6.84%	1.98	2.71%

#### 4 方法验证

为验证点面转换法的泛化性, 在石津灌区渠首站开展实测验证, 根据灌区春灌期用水情况, 选择 18、45、63、70 和 80  $m^3/s$  共计 5 种不同输水工况下中垂线流速进行尾流拟合分析, 分析结果见表 4。交点处水深与测线水深的比例在 0.06~0.16 之间, 根据尾流函数计算交点流速, 交点流速与断面平

均流速的拟合关系如图 9 所示，石津灌区渠首站的点面转换关系呈较好的线性关系，拟合方差达 0.981。

表 4 石津灌区渠首站交点水深  $h_0$  与水力参数之间的关系表  
Table 4 Relationship between water depth  $h_0$  and hydraulic parameters

边坡系数	流量 $Q/(m^3/s)$	$Re$	$Fr$	$y_+$	$u_+$	交点水深 $h_0/m$	相对水深 $h_0/h$	交点流速 $u_0/(m/s)$
2	18.86	1029662	0.41	4.07	18.36	0.08	0.16	1.398
	45.85	2230954	0.50	3.98	19.42	0.05	0.07	1.823
	63.90	2887008	0.49	4.07	18.35	0.06	0.06	1.921
	71.40	3148787	0.48	4.07	18.35	0.05	0.06	1.990
	79.22	8435338	0.46	4.27	18.11	0.08	0.08	2.049

选择  $70 m^3/s$  和  $80 m^3/s$  输水工况用于验证，采用不同尾流强度系数拟合两个流量下的中垂线流速数据，选取拟合曲线相关系数最高的尾流强度值推求交点流速，根据石津灌区渠首站点面转换关系计算断面平均流速，通过流速面积法计算断面流量。以详测法计算的流量为基准，表 5 给出了两个流量的误差，点面转换法测流误差小于 3.10%，满足相关标准要求。

## 5 讨论

大流量宽浅型明渠通常为灌区总干渠，为保证下游及时、足量供水，对量水次数和精度均有较高要求。采用非接触式雷达往往只率定有限的过流情景，导致某些水深下误差较大，且对于较宽的渠道要安装多个设备才能保证测流精度。水质较好的灌区采用有线式超声波时差法具有较高精度，需要对渠底和边壁进行停水施工；无线式超声波时差法在较宽的渠道应用较少，其稳定性和准确性有待进一步考证。标准规范法要求不同断面宽度布设 3~10 条测线，每条垂线测量 1~5 个测点，实施一次需 2~3 人用时 60 min 左右，操作烦杂费时极不方便。本文提出了一种基于尾流交点流速表征断面平均流速的明渠流量计算方法，首先根据目标断面中垂线历史流速数据可得尾流交点流速和断面平均流速的线性关系即该断面点面流速转换关系，其次仅需测量渠道中垂线流速，运用尾流函数对测流断面中垂线流速实测值进行拟合得到尾流交点流速，最后根据已知点面转化关系求出断面平均流速再乘以面积计算出流量。从以上工作步骤可知不同的渠道都能通过该方法得到相应的点面转化关系，该方法具有通用性，且与传统流速仪面积流速方法相比仅需布设一条测线，简化渠道流量测量过程、提高测流精度、促进灌区工作效率提升。

表 5 石津灌区渠首站计算流量误差  
Table 5 Calculation error of flow rate at Shijin canal headworks

工况	详测法 $Q/(m^3/s)$	点面转换法 $Q/(m^3/s)$	点面转换法误差
1	71.02	70.72	0.42%
2	77.46	79.86	3.10%

我国地形地貌多样，灌区从水源引水到田间距离远，渠道几何规模变异大，由于试验条件的限制，只能设计有限的工况对本文的方法进行验证，试验仅在断面规则水流较稳的渠道标准断面进行，

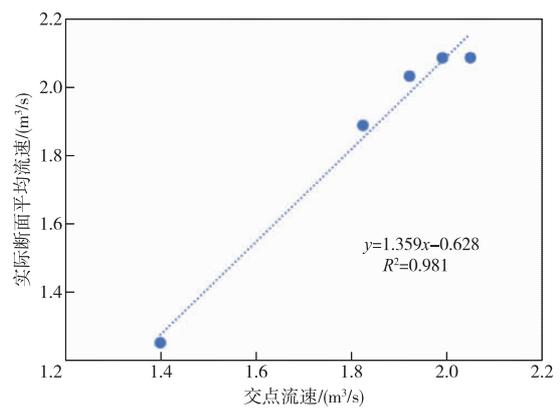


图 9 石津灌区渠首站断面平均流速  $\bar{u}$  与交点流速  $u_0$  的关系图

Fig.9 Relationship between average sectional velocity  $\bar{u}$  and intersection velocity value  $u_0$

对于断面不规则、糙率不均、流态不稳等情景下点面转换法的适应性还需要更为深入研究。其次点面流速转换计算流量方法本身要先进行多工况测量得出关系曲线，工况往往是连续的，很难在短时间内得出包含最大、最小流量下的关系曲线。并且该方法对渠底流速数据和断面面积的测量的精度要求很高，仅适用于接触式点流速测流场景，对于层流速、垂线平均流速等和断面平均流速转换关系有待研究。

## 6 结论

(1) 本文运用尾流函数对测流断面中垂线流速实测值进行拟合，不同流量、边坡及尾流强度下各组合的拟合曲线均交于一点，交点位于  $0.06h \sim 0.18h$  之间，交点流速和断面平均流速呈线性关系，基于该特性提出明渠流量计算的点面转换法。

(2) 通过开展相关试验对比不同量水方法的相对误差和平均误差，标准规范法、水面一点法及点面转换法计算渠道流量相对误差分别为  $0.13\% \sim 3.20\%$ 、 $0.20\% \sim 6.84\%$  和  $0.17\% \sim 3.32\%$ ，平均误差分别为  $2.22\%$ 、 $4.35\%$  和  $2.25\%$ ，综合相对误差和平均误差，点面转换法与标准规范法测流精度相差不大，测流精度显著高于水面一点法，且点面转换法比标准规范法测点数量显著减少  $40\%$  以上，因此综合精度和省工两方面来考虑，点面转换法适宜在生产实际中采用。

(3) 不同的渠道都能通过本文提出的点面转换法得到相应的点面转化关系，该方法具有通用性。基于实测资料有限，本次研究仅对人工修建的梯形明渠进行流量计算，对于 U 形明渠及断面不规则的天然河道等，该方法的适应性还需要更为深入研究。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 谢崇宝. 大中型灌区取用水量测控设施计量能力提升探讨[J]. 中国水利, 2022(1): 52-55. (XIE C B. Discussion on improving the measurement capability of water intake monitoring facilities in large and medium irrigation areas[J]. China Water Resources, 2022(1): 52-55. (in Chinese))
- [ 2 ] 徐红, 邓湘汉, 王建文. 水量量测设备计量检定/校准标准现状及需求分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(1): 81-85. (XU H, DENG X H, WANG J W. Status and demand analysis of verification/calibration standards for water measurement equipment[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(1): 81-85. (in Chinese))
- [ 3 ] 邓数学, 叶爱中, 通洪福, 等. 河道流量测量与计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(6): 70-74. (DENG X X, YE A Z, TONG H F, et al. Study on river flow measurement and calculation methods[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6): 70-74. (in Chinese))
- [ 4 ] 左建, 邓山, 张洪霞, 等. 白水水文站表面流速代表性研究[J]. 水文, 2021, 41(3): 19-24. (ZUO J, DENG S, ZHANG H X, et al. Study on the representativeness of surface flow velocity at Baihe hydrological station [J]. Hydrology, 2021, 41(3): 19-24. (in Chinese))
- [ 5 ] 刘德斌, 张健, 邹玉田, 等. 库容法在灌区量水中的应用[J]. 节水灌溉, 2018(12): 109-113. (LIU D B, ZHANG J, ZOU Y T, et al. Application of reservoir capacity method in water measurement of irrigation districts[J]. Water Saving Irrigation, 2018(12): 109-113. (in Chinese))
- [ 6 ] 范恬, 周义仁. 横向摆杆式明渠测流方法在矩形渠道中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2022(1): 62-66, 73. (FAN T, ZHOU Y R. Application of transverse pendulum flume flow measurement method in rectangular channels [J]. Water Saving Irrigation, 2022(1): 62-66, 73. (in Chinese))
- [ 7 ] 戚玉彬. 考虑底坡影响的 U 形渠道量水槽流量公式研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 1-10. (QI Y B. Study on stage-discharge formula of measuring flume in U-shaped channel considering the influence of channel bottom slope[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(1): 1-10. (in Chinese))
- [ 8 ] 周和平, 马福忠, 王军, 等. 灌溉渠道断面测水简易快速方法[J]. 节水灌溉, 1999(6): 30-31. (ZHOU

- H P, MA F Z, WANG J, et al. Simple and rapid method for measuring irrigation channel sectional water in water-saving irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 1999(6): 30-31. (in Chinese))
- [ 9 ] 刘鸿涛, 赵宇博, 李晓军, 等. 宽浅式梯形渠道流速分布规律及流量计算方法研究[J]. *节水灌溉*, 2023(5): 56-61. (LIU H T, ZHAO Y B, LI X J, et al. Study on velocity distribution and flow calculation method of wide-shallow trapezoidal channels[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(5): 56-61. (in Chinese))
- [ 10 ] 王宝贺, 王竹青, 苏沛兰, 等. 基于水面一点法的明渠流量计算方法研究[J]. *节水灌溉*, 2023(5): 109-113, 121. (WANG B H, WANG Z Q, SU P L, et al. Study on channel flow calculation method based on single point method on water surface[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(5): 109-113, 121. (in Chinese))
- [ 11 ] 李效贤. 大型渠道超声波法与流速仪法测流比对试验[J]. *中国农村水利水电*, 2006(8): 107-108, 112. (LI X X. Comparison test of large channel flow measurement by ultrasonic method and velocity meter method[J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2006(8): 107-108, 112. (in Chinese))
- [ 12 ] 袁德忠, 曾凌, 蒋正清. 机器学习模型在 H-ADCP 在线测流系统中的应用[J]. *人民长江*, 2020, 51(11): 70-75. (YUAN D Z, ZENG L, JIANG Z Q. Application of machine learning model in H-ADCP online flow measurement system[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(11): 70-75. (in Chinese))
- [ 13 ] 邓红霞, 李存军, 孙熠, 等. BP 网络日径流序列预测的 NLP 适用条件研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2008, 6(2): 100-104. (DENG H X, LI C J, SUN Y, et al. Study on applicability conditions of NLP in BP network daily runoff sequence prediction[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2008, 6(2): 100-104. (in Chinese))
- [ 14 ] 张新华, 李红霞, 肖玉成, 等. 河流最小生态基础流量计算方法研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011, 9(1): 66-73. (ZHANG X H, LI H X, XIAO Y C, et al. Study on calculation method of minimum ecological base flow in rivers[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, 9(1): 66-73. (in Chinese))
- [ 15 ] COLES D. The law of the wake in the turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechines*, 1956, 1(2): 191-226.
- [ 16 ] 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 C J, LI D X, WANG X K. Frictional velocity and velocity distribution of uniform flow in open channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(8): 950-955. (in Chinese))
- [ 17 ] HAUET A, MORLOT T, DAUBAGNAN L. Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams; A review over a large sample of rivers[J]. *E3S Web of Conferences*, 2018(40): 6-15.
- [ 18 ] GUO J. Turbulent velocity profiles in clear water and sediment-laden flows[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1998.
- [ 19 ] ABSI R. An ordinary differential equation for velocity distribution and dip-phenomenon in open channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(1): 82-89.
- [ 20 ] GUO J. Modified log-wake-law for smooth rectangular open channel flow[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2014, 52(1): 121-128.
- [ 21 ] PATEL N, SHAHI J, GUO J. Applications of second log-wake law for turbulent velocity distributions in laboratory flumes and natural rivers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 147(9): 1-8.
- [ 22 ] KEULEGAN G H. Laws of turbulent flow in open channels[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1938, 21(6): 707-741.
- [ 23 ] 尹进高, 吕宏兴, 栾维功, 等. 梯形渠道断面流速分布规律试验研究[J]. *人民长江*, 2008(12): 67-69. (YIN J G, LV H X, LUAN W G, et al. Experimental study on velocity distribution in trapezoidal channel cross-sections[J]. *Yangtze River*, 2008(12): 67-69. (in Chinese))

## Research on open channel flow calculation method based on wake function

LIU Jianli<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, BAI Meijian<sup>1,2</sup>, ZHANG Baozhong<sup>1,2</sup>, SHAO Shuaichao<sup>1,2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Ministry of Water Resources Digital Twin Basin Key Laboratory, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The reasonable representation of the average flow velocity in the cross-section is a key factor in accurate measurement of open channel flow. This paper proposes a method for calculating the flow rate in a open channel based on the velocity characterization of the cross-section using the wake intersection flow velocity. Experiments were conducted at the Shandong Province Water Resources Equipment Industry Measurement and Testing Center's variable channel detection system. Eight sets of experiments were conducted with two slope coefficients of 0.5 and 1.0, and four flow gradients of 0.42, 0.83, 1.56, and 2.03 m<sup>3</sup>/s. The study investigated the distribution of flow velocities in different combinations, fitted the mid-line velocity data using the wake function, proposed a point-to-surface conversion method for flow measurement, analyzed the flow measurement errors between the standard method and the point-to-surface conversion method, and applied it in the canal of the Shijin Irrigation District. The results showed that for wide and shallow open channels, the maximum flow velocity occurs at the mid-line water surface, and the fitted curves of the measured flow velocities with different wake intensity coefficients intersect at a point. The flow velocity at the wake intersection point under different combinations has a good linear relationship with the cross-sectional average flow velocity. The flow rate calculation error using the point-to-surface velocity conversion relationship was less than 3.32%, meeting the requirements of the standard method. The point-to-surface conversion method applied at the head measurement station of the Shijin Irrigation District in Hebei Province yielded a flow measurement error of less than 3.10%, reducing the measurement points by more than 40% compared to the standard method. The study shows that the point-to-surface conversion method can significantly reduce the number of measurement points while ensuring measurement accuracy, demonstrating its high practical value for improving the efficiency of flow measurement in irrigation districts.

**Keywords:** open channel; velocity distribution; wake function; velocity-area method

(责任编辑: 祁 伟)

---

(上接第 172 页)

## Study on the response of Calcium bicarbonate formed by pseudo-karstification to acidic environment and modified dispersive soil

GUO Hongdong<sup>1,2</sup>, FAN Henghui<sup>1,2</sup>, WEN Jixiang<sup>1,2</sup>, GUO Haowei<sup>1,2</sup>,  
JU Peng<sup>1,2</sup>, WU Zhipeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering/Museum of Problematic Rock and Soil, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** To enhance the modification effect of Calcium Bicarbonate Formed by Pseudo-Karstification (CFPK) on dispersive soil, solution index determination tests, dispersibility discrimination tests, aggregate water stability tests, and mechanism analysis tests were conducted by controlling the initial pH of the reaction, in order to investigate the influence of acidic environment on the preparation of CFPK, evaluate the modification effect of CFPK on dispersive soil, and clarify the mechanism of how acidic environment optimizes the CFPK modification of dispersive soil. The results show that: (1) As the solution environment changes from neutral (pH=7.00) to acidic (pH=6.00), the calcium ion concentration of CFPK increases from 26.10 mmol · L<sup>-1</sup> to 37.30 mmol · L<sup>-1</sup> with a 42.91% increase. (2) Under neutral conditions, the mass ratio of the generated solution to dispersive soil required for complete modification is 2.5:1, resulting in a content of aggregates larger than 0.25 mm of 19.54% and a mean weight diameter of 0.210 mm. Under acidic conditions, the required mass ratio is reduced to 1.5:1, with a content of aggregates larger than 0.25 mm of 23.47% and a mean weight diameter of 0.247 mm, representing increases of 3.93% and 17.62% respectively, while the solution usage is reduced by 40%. (3) The increased concentration of CFPK prepared under acidic conditions, with more H<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> acting on the dispersive soil, further reduces its dispersibility. In practical engineering, the reaction liquid can be prepared under acidic solution conditions to obtain CFPK with better modification effects.

**Keywords:** dispersive soil; karst system; soil aggregate; pH; mechanisms

(责任编辑: 王学风)