

## 基于电导式传感器径流流速测量系统的试验研究

王 为<sup>1</sup>, 李小昱<sup>1,2</sup>, 张 军<sup>1</sup>, 刘 泉<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>2,3</sup>

(1. 华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室  
中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100080)

**摘 要:** 在土壤侵蚀和水土流失研究中, 坡面径流流速是径流计算、土壤侵蚀预报中不可缺少的水动力参数, 目前尚无广泛应用的径流流速测量仪, 研究快速的径流流速测量具有重要意义。该文基于互相关理论, 建立了基于虚拟仪器 Lab VIEW 的径流流速的测量系统, 并采用自制的电导式传感器, 研究了两传感器间距对测量系统的影响, 测量了 5 个泥沙含量水平下的径流流速。结果表明: 测量系统适用的泥沙含量范围为 0~ 250 kg/m<sup>3</sup>, 测量误差为 4.5%; 若以染料示踪法测量的流速作为标准值进行修正, 修正后的测量误差为 3.81%。

**关键词:** 径流流速; 电导式传感器; 相关流速; LabVIEW

**中图分类号:** TP183;TV14

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)2-0001-05

王 为, 李小昱, 张 军, 等. 基于电导式传感器径流流速测量系统的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 1- 5.

Wang Wei, Li Xiaoyu, Zhang Jun, et al. Experimental study on measurement system of runoff velocity based on conductance sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 1- 5. (in Chinese with English abstract)

### 0 引 言

为了减少水土流失给人类生产和生活带来的严重影响, 需要建立水土流失预测和预报模型, 定量评价水土流失和水土保持效益, 这是研究和治理水土流失的有效手段。在水土流失研究中, 坡面径流流速是径流计算、土壤侵蚀预报中不可缺少的水动力参数。开展径流流速的研究对于深入研究坡面水流的动力机制、进一步揭示土壤侵蚀机理至关重要。如何准确测量坡面径流流速一直是国内外学者进行坡面径流试验研究的难点。目前, 尚没有一种广泛使用的测量径流流速的专用仪器, 国内外众多研究机构依然采用染料示踪法测量径流流速<sup>[1-5]</sup>, 它是最常用的野外和室内坡面径流流速测量方法。但该方法需要人工操作, 并且存在人为目视产生的误差。研究者在染料示踪法的基础上做出改进, 提出了盐液示踪法<sup>[6-9]</sup>, 其基本原理是利用含盐水流与非含盐水电导率的不同来确定含盐水流到达被测断面所需要的时间。夏卫生等人在盐液示踪法的基础上提出了电解质脉冲法测量坡面径流流速<sup>[10-14]</sup>, 该方法在示踪法的基础上, 假设加入的盐液为电解质脉冲, 建立盐液在水流中迁移的数学模型, 并求得解析解, 再根据测量结

果拟合出水流速度。盐液示踪法和电解质脉冲法克服了人工计时和目视观测带来的误差, 但它们需要复杂的盐液添加装置。张科利等人<sup>[15]</sup>采用旋桨式微流速测定仪测定坡面径流流速, 但此仪器仅适用于含沙量较低的径流, 而且对径流流场扰动过大。尽管众多学者提出了上述多种径流流速测量方法, 但目前最常用的测量方法还是染料示踪法。

土壤侵蚀所形成的坡面径流实际上是水沙液固两相流, 是多相流的一种。20 世纪 60 年代中期发展起来的以相关技术为基础构成的两相流量测量系统, 可以采用不同原理的传感器来获取两相流体的流动噪声信号, 经相关处理后, 求得离散相的平均流速。英国的 Butterfield<sup>[16]</sup>等人 1961 年提出利用铁板表面随机分布的斑点在运动过程中产生的随机噪声信号, 采用互相关方法测量出铁板的速度; Mesch<sup>[17]</sup>等人把相关流速测量技术应用到流体流动特性的研究中, 对稳定流体和非稳定流体的传播方式进行实验验证; 哈尔滨船舶工程学院的宿成基<sup>[18-20]</sup>等人对测量管道气固两相流流量的梯度相关法进行了研究, 证明梯度相关方法仅适用于测量低浓度流体; 华中科技大学的向廷元、黄南民<sup>[21-23]</sup>等人研制了管道用纸浆光学相关流量计; 刘兴斌等人<sup>[24,25]</sup>采用电导式传感器利用相关算法对管道油水两相流的流量进行了研究。本文研究从两相流理论出发, 采用自制的电导式传感器和相关算法, 建立了基于虚拟仪器 LabVIEW 的径流流速测量系统。两相流测量技术原本是为了解决管道中两相流体的测量问题而提出的, 测量系统有很强的应用背景, 而土壤侵蚀形成的径流情况复杂, 尚无将

收稿日期: 2006-06-29 修订日期: 2006-12-31

基金项目: 中国科学院、水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-92)

作者简介: 王 为, 高级工程师, 主要从事智能化检测与控制技术方面的研究。武汉 华中农业大学工程技术学院, 430070。

Email: wangwei@mail.hzau.edu.cn

此原理应用于径流流速的测量。

## 1 测量原理

流体在流动时, 流体内部存在着各种与流动状况有关的“噪声”。这种“噪声”由流体内部“微团”运动产生。流体流动产生的噪声信号是一种随机信号, 表现在它随时间变化, 不能用确切的数学公式描述, 也不能准确地预测, 只能在统计意义下加以研究<sup>[26]</sup>。相关流速测量技术的实质是利用流体流动中固有的或外部引入的流动噪声作为示踪物, 通过合适的传感器将这些流动噪声转化为电信号, 采用噪声分析技术确定示踪物在传感组件之间的渡越时间, 从而测出流动速度, 计算出流量。在该测试系统中, 径流流动噪声利用电导式传感器检测, 通过信号处理提取有用的流动噪声。

在相关多相流检测技术中, 需要满足两点要求: 首先, 选择的传感器能很好地检测到“流动噪声”; 其次, 经过传感器上下游的流体要相似, 满足“凝固”流动图型假设。测试系统中所设计的电导式传感器敏感于泥沙和水组成的两相流的电导率, 满足第一个条件; 由于上下游传感器间的距离足够小, 流体流动图型的变化相对较小, 可近似认为满足“凝固”的流动图型假设。因此, 传感器的两路信号具有相似性, 可认为下游输出信号是对上游输出信号的延迟, 使用测试系统时, 上下游流体中的阻抗信号转化为电压信号  $x(t)$  和  $y(t)$ , 且  $y(t) = x(t - \tau_0)$ , 其中  $\tau_0$  就是延迟时间, 也称为渡越时间, 对它进

行互相关处理, 即

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t + \tau - \tau_0) dt \\ &= R_x(\tau - \tau_0) \end{aligned} \quad (1)$$

可见具有“凝固”图型假设的流体的互相关函数, 实质上是在时间轴上移了一个  $\tau_0$  的自相关函数。互相关函数在  $\tau_0$  处具有最大峰值, 可利用峰值搜索程序获得渡越时间  $\tau_0$ , 从而根据上下游传感器间距  $L$  获得径流流速  $v = \frac{L}{\tau_0}$ 。

## 2 试验设备及方法

### 2.1 径流流速测量系统

径流流速测量系统如图 1 所示。该测量系统包括: 信号激励部分、电导式传感器、滤波调理电路以及基于 LabVIEW 的数据采集处理系统。信号激励部分由正弦信号发生器和交流恒定电流源构成; 设计了电导式传感器(已申请国家专利, 申请号: 200520099751.X), 其由 6 个紫铜平板式电极镶嵌在绝缘的有机玻璃上构成, 两传感器的间距可调, 最外端的 1、6 电极为信号激励源, 中间的 2、3 电极和 4、5 电极分别为上、下游检测电极; 互相关、峰值检测以及流速测量基于 Lab VIEW 虚拟仪器系统完成。

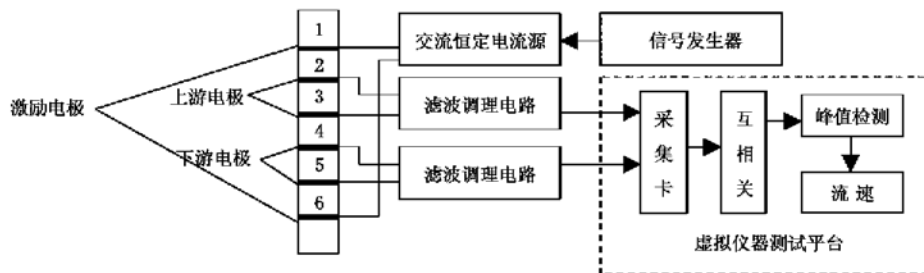


图 1 径流流速测量系统原理图

Fig. 1 Principle of runoff velocity measurement system

### 2.2 试验材料

采用湖北黄棕壤作为土样。使用粉碎机将黄棕壤粉碎成细小的颗粒, 然后用 200 目的筛子过筛。配制水沙混合液前先将泥土烘干, 用 0.001 精度的电子天平称取所需质量的泥沙。配制完成的水沙混合液在试验时还需要加入一定量的悬浮液, 试验时启动搅拌机, 使泥沙颗粒保持悬浮状态。

### 2.3 试验方法

在径流模拟试验台上进行试验, 通过调整水槽的倾

角以控制不同的流速。对同一个浓度含量的泥沙, 在每个倾角下用染料示踪法 5 次重复测出流速值, 取平均值。在此条件下, 相关法也 5 次重复测出流速值, 取平均值。以染料示踪法测得的流速作为标准值, 对相关法测得的流速进行修正。试验设计如下。

1) 单因素试验: 将模拟水槽倾角调整为  $15^\circ$  固定不变, 从而使水流速度保持一定。采用清水作为试验对象, 用相关法和染料示踪法测量水流的流速, 以染料示踪法作为标准值计算相对误差。在测量系统的传感器间距  $L$

取 5、10、15 mm 时, 计算不同  $L$  取值下相关流速的相对误差, 通过对比相对误差的大小, 确定  $L$  的最佳取值。

2) 根据选择的最佳传感器, 在水沙混合液 5 个泥沙含量水平: 0(清水)、50、150、250、350  $\text{kg}/\text{m}^3$  时做 5 组试验。每个泥沙含量水平的水沙混合液分别在模拟水槽采用下列 6 个倾角:  $1^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$  时测量流速。

### 3 结果与分析

#### 3.1 两传感器间距 $L$ 的确定

采用清水作为试验对象, 将模拟水槽倾角调整为  $15^\circ$  固定不变, 从而使水流速度保持一定。使用染料示踪法重复 5 次测量流速值, 计算平均值, 测得径流流速平均值为  $1.712 \text{ m/s}$ 。分别将上下游传感器间距  $L$  调为 5、10、15 mm 时测量径流流速, 每种间距测量 5 次求平均值, 然后以示踪流速作为标准值计算相对误差, 测量结

果如表 1 所示。当上下游传感器间距为 10 mm 时, 测量相对误差为 3.20%, 测量误差最小, 故选定  $L$  取值为 10 mm。

表 1 不同  $L$  值时径流流速的相对误差

Table 1 Relative errors of runoff velocity under different  $L$  values

$L$ /mm	相关流速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	示踪流速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差 /%
5	1.954	1.712	14.10
10	1.767	1.712	3.20
15	1.120	1.712	34.60

注: 表中数据为 5 次测量值的均值。

#### 3.2 不同泥沙含量的径流流速

在水沙混合液 5 个泥沙含量水平: 0(清水)、50、150、250、350  $\text{kg}/\text{m}^3$  时做 5 组试验。每个泥沙含量水平的水沙混合液分别在模拟水槽采用 6 个倾角:  $1^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$  时测量流速。测量结果如表 2 所示。

表 2 不同泥沙含量的径流流速

Table 2 Runoff velocity under different sediment concentrations

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

坡度/ $(^\circ)$	泥沙含量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$									
	0		50		150		250		350	
	示踪法	相关法	示踪法	相关法	示踪法	相关法	示踪法	相关法	示踪法	相关法
1	0.650	0.664	0.682	0.708	0.661	0.689	0.478	0.490	0.536	0.595
5	1.141	1.172	0.993	0.948	1.018	1.052	0.893	0.877	0.954	1.026
10	1.540	1.605	1.530	1.562	1.232	1.265	1.205	1.252	1.188	1.279
15	1.702	1.753	1.596	1.580	1.590	1.613	1.477	1.461	1.353	1.231
20	2.031	2.120	1.905	1.972	1.711	1.778	1.863	1.916	1.468	1.372
25	2.165	2.248	2.101	2.192	1.892	1.955	1.970	2.031	1.551	1.409

注: 表中数据均为 5 次测量值的平均值。

#### 3.3 不同泥沙含量的试验误差分析

为分析系统测量精度, 以染料示踪法作为标准, 将 5 组采用相关算法测量的结果进行误差分析, 如表 3 所示。0~250  $\text{kg}/\text{m}^3$  泥沙含量下的径流流速最大误差为 4.5%; 在 350  $\text{kg}/\text{m}^3$  的泥沙含量下, 测量误差较大。当泥沙含量为 350  $\text{kg}/\text{m}^3$  时成为黏稠泥浆, 在工程实际中, 0~250  $\text{kg}/\text{m}^3$  的泥沙含量范围可以满足实际测量的要求, 故该测量系统的泥沙含量的适用范围为 0~250  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 3 不同泥沙含量的相对误差

Table 3 Relative error under different sediment concentrations %

坡度 / $(^\circ)$	泥沙含量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$				
	0	50	150	250	350
1	2.20	3.80	4.10	2.40	11.00
5	2.60	-4.50	3.30	-1.80	7.50
10	4.20	2.10	2.60	3.90	7.60
15	3.00	-1.00	1.50	-1.10	-9.00
20	4.40	3.50	3.90	2.80	-6.50
25	3.80	4.30	3.30	3.10	-9.11

#### 3.4 测量结果的修正

为了提高测量的准确性, 用示踪法所测得的流速修正相关法所测得的流速, 对 0~250  $\text{kg}/\text{m}^3$  4 个泥沙含量下测量的流速采用回归分析进行修正, 其方程如下。

当为清水时的拟合方程为

$$\begin{aligned} V_c &= 0.9527V_s + 0.0199 \\ R^2 &= 0.9998 \\ F &= 19038.45 \end{aligned} \quad (2)$$

当泥沙含量为 50  $\text{kg}/\text{m}^3$  时的拟合方程为

$$\begin{aligned} V_c &= 0.9388V_s + 0.0655 \\ R^2 &= 0.9955 \\ F &= 878.26 \end{aligned} \quad (3)$$

当泥沙含量为 150  $\text{kg}/\text{m}^3$  时的拟合方程为

$$\begin{aligned} V_c &= 0.9728V_s - 0.035 \\ R^2 &= 0.9991 \\ F &= 4673.50 \end{aligned} \quad (4)$$

当泥沙含量为 250  $\text{kg}/\text{m}^3$  时的拟合方程为

$$\begin{aligned} V_c &= 0.9637V_s + 0.0025 \\ R^2 &= 0.9977 \\ F &= 1748.97 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $V_c$ ——示踪速度, m/s;  $V_s$ ——相关速度, m/s, 其中  $F_{0.01}(1, 4) = 21.2$ , 可知上述回归方程均显著。将表 2 中相关法测量径流流速根据获得的回归方程进行修正, 修正结果表见表 4 所示。同样以染料示踪法作为标准进行误差分析, 结果见表 5 所示, 对照表 3 结果可知修正后最大误差由 4.5% 降为 3.81%。

表 4 修正径流流速

Table 4 Proved runoff velocity  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 

坡度 /(°)	泥沙含量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$							
	0		50		150		250	
	示踪 法	修正 流速	示踪 法	修正 流速	示踪 法	修正 流速	示踪 法	修正 流速
1	0.650	0.652	0.682	0.730	0.661	0.667	0.478	0.475
5	1.141	1.136	0.993	0.955	1.018	1.020	0.893	0.848
10	1.540	1.549	1.530	1.532	1.232	1.227	1.205	1.209
15	1.702	1.690	1.596	1.549	1.59	1.566	1.477	1.410
20	2.031	2.040	1.905	1.917	1.711	1.726	1.863	1.849
25	2.165	2.162	2.101	2.123	1.892	1.898	1.970	1.960

注: 表中数据均为 5 次测量值的均值。

表 5 修正后不同泥沙含量的相对误差

Table 5 Relative errors under different proved sediment concentrations %

坡度 /(°)	泥沙含量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$			
	0	50	150	250
1	-1.67	3.48	-3.25	-3.11
5	-2.99	0.48	-3.06	-3.35
10	-3.44	-1.84	-3.00	-3.42
15	-3.56	-2.02	-2.94	-3.46
20	-3.75	-2.68	-2.92	-3.50
25	-3.81	-3.00	-2.90	-3.50

## 4 结 论

1) 自制电导式传感器, 可检测径流流速, 当两传感器间距为 10 mm 时, 测量精度最高。

2) 基于相关流速测量原理, 采用自制电导式传感器基于虚拟仪器 Lab VIEW 构建了径流流速测量系统。

3) 径流泥沙含量的适用范围为 0~ 250  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 测量误差为 4.5%, 以染料示踪法修正后, 误差为 3.81%, 该测试系统可实时、在线、准确的测量径流流速。

### [参 考 文 献]

[1] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882- 886.

[2] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5- 7, 49.

[3] Kirkby. 山坡水文学[M]. 刘新仁等译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.

[4] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing [J]. Earth surface Processes and landforms, 1986, 11: 653 - 657.

[5] 夏卫生, 雷廷武, 赵 军, 等. 示踪法测定水流流速的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 84- 86.

[6] 夏卫生, 雷廷武, 赵 军. 泥沙含量对盐液示踪法经验系数影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 97- 100.

[7] Abrahams A D, Atkinson J F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow [J]. Water Resources Research, 1993, 29: 3021- 3028.

[8] Calkins D, Dunn T. A salt tracing method for measuring channel velocities in Small Mountain streams [J]. Journal of Hydrology, 1970, 11: 379- 392.

[9] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow [J]. Soil technology, 1992, 5: 289- 301.

[10] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 坡面薄层水流中电解质脉冲迁移模型[J]. 水利学报, 2003, 11: 90- 95.

[11] 夏卫生, 雷廷武, 赵 军, 等. 薄层水流速度测量系统的研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 781- 784.

[12] 夏卫生, 雷廷武, 刘春平, 等. 坡面薄层水流流速测量的比较研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 23- 26.

[13] 夏卫生, 雷廷武, 吴金水, 等. 电解质脉冲法测量薄层水流流速的实验研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11): 1277- 1281.

[14] 夏卫生, 雷廷武, 赵 军. 薄层水流速度、弥散系数与泥沙含量关系的初步探讨[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 78 - 79, 83.

[15] 张科利, 秋吉康弘, 张兴奇. 坡面径流冲刷及泥沙输移特征的试验研究[J]. 地理研究, 1998, 17(2): 163- 169.

[16] Butterfield M H, Bryant G F, Dowing J. A new method of strip speed measurement using random waveform correlation [J]. Trans Soc Instrum Tech, 1961, 13(2): 111- 113.

[17] Mesch F, et al. Transit time correlation: a survey of its application to measuring transport phenomena [J]. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, 1974, 96: 414- 420.

[18] 宿成基, H. Braun. 梯度相关法测量两相流流量的精度与离散性研究[J]. 计量学报, 1993, 14(2): 135- 139.

[19] 宿成基, 龚世璋, 夏 虹. 梯度相关法——一种新型非接触流量测试技术[J]. 黑龙江自动化技术与应用, 1993, 12(2): 5 - 8.

[20] 宿成基, 龚世璋. 梯度相关法测量流体速度与流量的理论及应用研究[J]. 核科学与工程, 1995, 15(4): 325- 329.

[21] 向廷元, 郑莹娜, 黄南民, 等. 纸浆光学相关流量计的研究[J]. 中国造纸, 1991, 10(3): 37- 43.

[22] 郑莹娜, 黄南民. 纸浆流量相关测量光学传感器的研究

- [J]. 仪表技术与传感器, 1991, 4: 7- 9.
- [23] 黄南民, 樊鑫瑞. 纸浆流量相关测量信号的光电检测系统[J]. 工业仪表与自动化装置, 1997, 3: 35- 37.
- [24] 刘兴斌, 胡金海, 徐苓安, 等. 电导式相关流量计应用于油井下流量测量[J]. 仪器仪表用户, 2001, 8(3): 8- 11.
- [25] 胡金海, 刘兴斌, 黄春辉, 等. 电导式相关流量测量传感器[J]. 传感器世界, 2001, 12: 10- 15.
- [26] 张 进. 多相流相关流量测试方法的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1999.

## Experimental study on measurement system of runoff velocity based on conductance sensor

Wang Wei<sup>1</sup>, Li Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Zhang Jun<sup>1</sup>, Liu Quan<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>2,3</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil  
and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In the research of the soil erosion and soil losses, the runoff velocity of slope is an indispensable hydro-dynamic parameter in the runoff computation and the soil erosion forecast. There is still no special instrument which is widely used to measure runoff velocity. It is very significant to construct a fast measurement instrument on runoff velocity. On the basis of correlation theory, the runoff velocity measurement system was established based on virtual instrument LabVIEW. The system uses the conductance sensor to acquire signal. Effect of the space between conductance sensors on the measurement system and the runoff velocity under five sediment concentrations were studied. Results indicate that the suitable sediment concentration scope of the measurement system is 0~ 250 kg/m<sup>3</sup> and the greatest relative error of the system is 4.5%. While taking the flow velocity measured by the dye tracer technique as standard value to correct the correlation velocity, the greatest relative error of the proved velocity reduces to 3.81%.

**Key words:** runoff velocity; conductance sensor; correlation velocity; LabVIEW