

基于光电传感器和示踪法的径流流速测量系统的研究

刘 鹏, 李小昱^{*}, 王 为

(华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070)

摘 要: 坡面径流流速是决定土壤侵蚀强度的重要因素, 也是坡面侵蚀预报模型考虑的关键问题。采用 LabVIEW 虚拟仪器, 开发了一套室内模拟坡面径流流速测量系统, 包括试验台、光电传感器、采集卡及测控软件等。系统以泡沫粒子作为示踪粒子, 进行了室内模拟坡面径流流速的测试。结果表明, 自行设计的试验台能实现水沙循环使用, 在 $0 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ 含沙量、 $0 \sim 25^\circ$ 坡面的范围内, 该测量系统能够测定径流流速, 最大相对误差为 2.29%, 为坡面径流流速的快速、准确测量提供了一种新的有效的方法。

关键词: 坡面径流; 光电传感器; 示踪法; 流速; LabVIEW

中图分类号: S271; TV 121⁺. 2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007) 5-0116-05

刘 鹏, 李小昱, 王 为. 基于光电传感器和示踪法的径流流速测量系统的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 116-120.

Liu Peng, Li Xiaoyu, Wang Wei. Runoff flow velocity measurement system using photoelectric sensor and tracing method [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 116-120. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

黄土坡面土壤侵蚀发生发展过程包括细沟间侵蚀过程、细沟侵蚀过程和浅沟侵蚀过程, 在这三个过程中含沙量和坡面径流流速决定了土壤侵蚀的强度, 也是坡面侵蚀预报模型所考虑的关键问题。目前尚未有用于径流流速测量的专用仪器, 多数研究所和高校研究机构都采用示踪法来测量径流流速^[1,2]。国内外常用的示踪方法有: 染料示踪法^[3,4]、放射性核素示踪法、稳定性同位素中子活化技术以及磁性示踪剂等。染料示踪法的示踪剂主要用高锰酸钾溶液或碱性玫瑰红溶液, 将其溶液加入被测径流中, 记录染色水流流经测速区所用时间而进行测定, 该方法操作简单, 对环境污染较小, 但操作时需多人同时配合, 且存在溶液扩散作用。Richardson S D 等^[5]用若丹明作为示踪剂测量了以点状源释放出的污染淡水从咸水中流出的轨迹。若丹明是一种可疑的致癌物质, 因此若丹明的使用受到了限制。放射性核素示踪法、稳定性同位素中子活化技术对环境有污染, 需要特殊的试验设备, 投资较大, 而且设备较难布置^[6]。Ventura E 等^[7,8]提出用带磁性的示踪剂替代传统的核

素及稀土元素示踪的方法, 该方法在测试时需要各种粒径和密度分布的磁性示踪剂, 对于土壤性质变化较大的地区使用不方便。

因此, 研究一种在实验室内能够快速、准确测量径流流速的方法是非常重要的。该文是在示踪法原理的基础上以聚苯乙烯泡沫粒子为示踪粒子, 利用光电传感器及虚拟仪器技术, 建立一套能够对室内模拟坡面径流实现快速、实时、准确的测量系统, 为坡面径流流速的测量提供一种新的方法。

1 测量原理

示踪法是将固体、液体或气体一类粒子加入流动的流体中, 让它跟随流体流动, 从而测定流体流动情况的一种方法。示踪法测量流速要求粒子对流体既无扰动, 同时又要保证粒子的“跟随性”。粒子在测量距离为 S 所用时间为 T 时粒子平均流速为 $U = S/T$ 。这种粒子平均流速并不能真正反映流体的平均流速 $V = KU$, 式中 K 为经验系数^[9-11]。不同流态 K 值不同, 这些值都是经过多次试验下取平均值得到的^[12-16]。

以聚苯乙烯泡沫粒子作为示踪剂, 当聚苯乙烯泡沫粒子流经上下游光电传感器时可得到两个脉冲信号。上下游传感器距离 S 可在试验前测定, 测得通过上下游光电传感器的时间差 T , 即可求得泡沫粒子在此时间段内的平均流速 U 。通过流量法求取流速公式中系数 K , 最终实现示踪法的流速测量。

2 测量系统组成

基于光电传感器和示踪法的坡面径流流速测量系

收稿日期: 2006-07-19 修订日期: 2006-09-16

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: 刘 鹏(1980-), 男, 新疆喀什人, 主要从事智能化检测与控制技术的研究。武汉 华中农业大学工程技术学院, 430070

^{*}通讯作者: 李小昱, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化检测与控制技术的研究。武汉 华中农业大学工程技术学院, 430070。

Email: lixiaoyu@mail.hzau.edu.cn

统简图如图 1 所示。

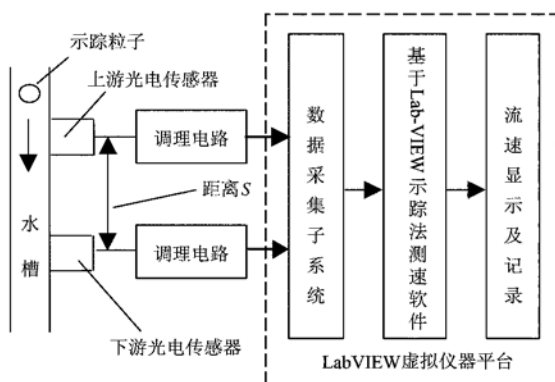


图 1 测量系统简图

Fig. 1 Principle of runoff velocity measuring system

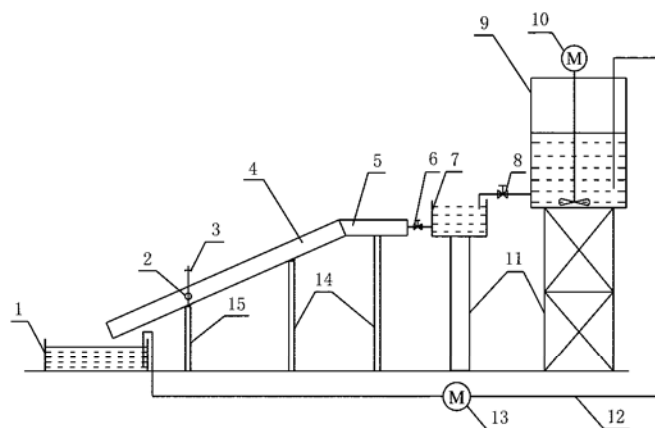
系统由信号采集及 LabVIEW 虚拟仪器平台组成。其工作流程是: 在水槽上游施放泡沫示踪粒子, 泡沫示踪粒子经过上游光电传感器和下游传感器时产生两个脉冲, 传感器输出信号经滤波调理电路处理后被数据采集卡采集进入计算机 LabVIEW 平台, 由示踪法测速软件可得到坡面径流流速。

3 测量系统的基本构成

测量系统由以下四个部分组成: 试验台、示踪粒子、传感器及滤波调理电路、采集卡及测控软件系统。

3.1 试验台

模拟坡面径流试验台示意图如图 2 所示。由模拟水槽、恒压供水装置、循环供水装置组成。



1. 蓄水池 2. 悬钩孔 3. 调节螺母 4. 模拟水槽 5. 过渡水槽
6. 板阀 7. 恒压水箱 8. 电磁阀 9. 供水桶 10. 搅拌器
11. 支架 12. 输水管 13. 泥浆泵 14. 承重支架 15. 可调支架

图 2 径流模拟试验台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of runoff flow simulating test-bed

1) 模拟水槽

模拟水槽 4 分为水平段和倾斜段两段。水平段水槽

长 0.6 m, 起缓冲水流的作用, 称为过渡水槽 5; 倾斜段水槽长 2 m, 其倾斜角度可以调整。

2) 恒压供水装置

恒压供水装置可确保出水水头恒定。恒压供水装置由水箱 7、单片机、电磁阀 8、液位计、板阀 6 组成。

3) 循环供水装置

循环供水装置由蓄水池 1、泥浆泵 13、输水管 12、供水桶 9 及搅拌器 10 等几部分组成。

3.2 聚苯乙烯泡沫示踪粒子

示踪物一般有液体、悬浮物或沉淀物^[17], 聚苯乙烯泡沫粒子属悬浮示踪物。泡沫粒子直径太小易受水流作用扩散并且由光电传感器得到的脉冲信号不明显造成测量误差; 粒子直径太大光电传感器容易得到脉冲信号但粒子发生碰撞后粒子不能保持原有速度跟随水流。沿模拟水槽的宽度方向流体流动速度在水槽中间最大, 距离水槽边壁越近水流速度也越小。泡沫粒子边缘的形状应圆滑, 以避免由于边缘各点流速不同引起泡沫粒子发生翻转或旋转而改变粒子速度。选择厚度为 3 mm 的泡沫板用空心冲模具制作, 直径分别为 5、10、15、20、25 mm, 厚度为 3 mm 的圆形片状粒子, 通过多次试验确定采用的泡沫粒子是直径为 15mm 的圆形片状粒子。

3.3 传感器及调理电路

测量系统的传感器由上下游两个传感器组成, 传感器垂直于液面布置在水槽测量段。传感器采用近红外反射式光电传感器 ST198A, 外形尺寸为 8.4 mm × 4.4 mm × 6.8 mm。由光电传感器输出的电压信号需经过滤波及放大才能满足数据采集卡应用范围, 图 3 为传感器及其调理电路。

3.4 采集卡及测控软件系统

3.4.1 数据采集卡

采用 NI 公司生产的 PCI-6133 数据采集卡作为虚拟仪器硬件。PCI-6133 数据采集卡采用多通道同步采样, 具有 14 位分辨率, 8 路差分模拟输入, 可以选择 4 个信号范围, 最大电压输入范围为 -10~10 V, 单通道的最大采样频率为 3 MHz。

3.4.2 测控软件

在 NI 公司虚拟仪器开发平台 LabVIEW 上开发了基于光电传感器和示踪法的径流流速测量系统软件。LabVIEW 将系统分解为多个更小的子模块或任务, 模块化的设计将简化系统的开发和维护^[18, 19]。

测量系统软件由四个模块组成: 采集通道设置模块、采集点数设置模块、脉冲峰值搜索模块、流速显示模块。软件前面板如图 4 示。

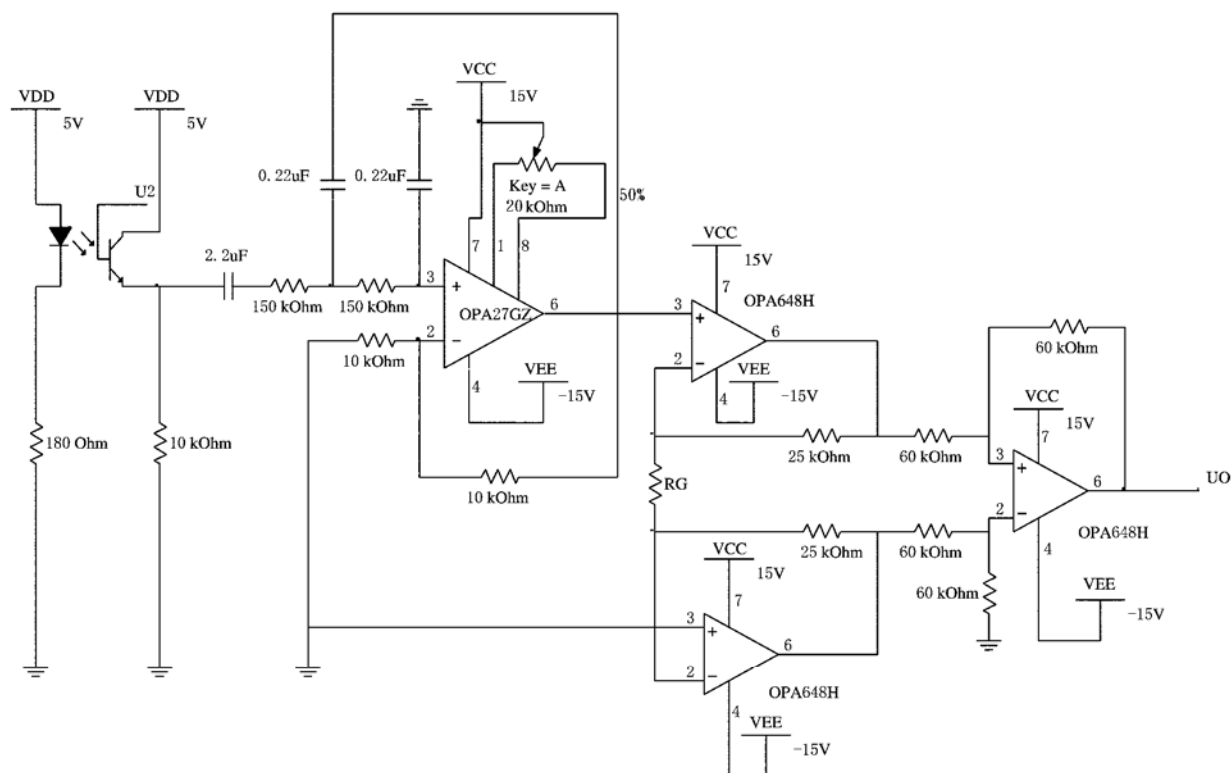


图3 传感器及调理电路

Fig.3 Sensors and their processing circuit

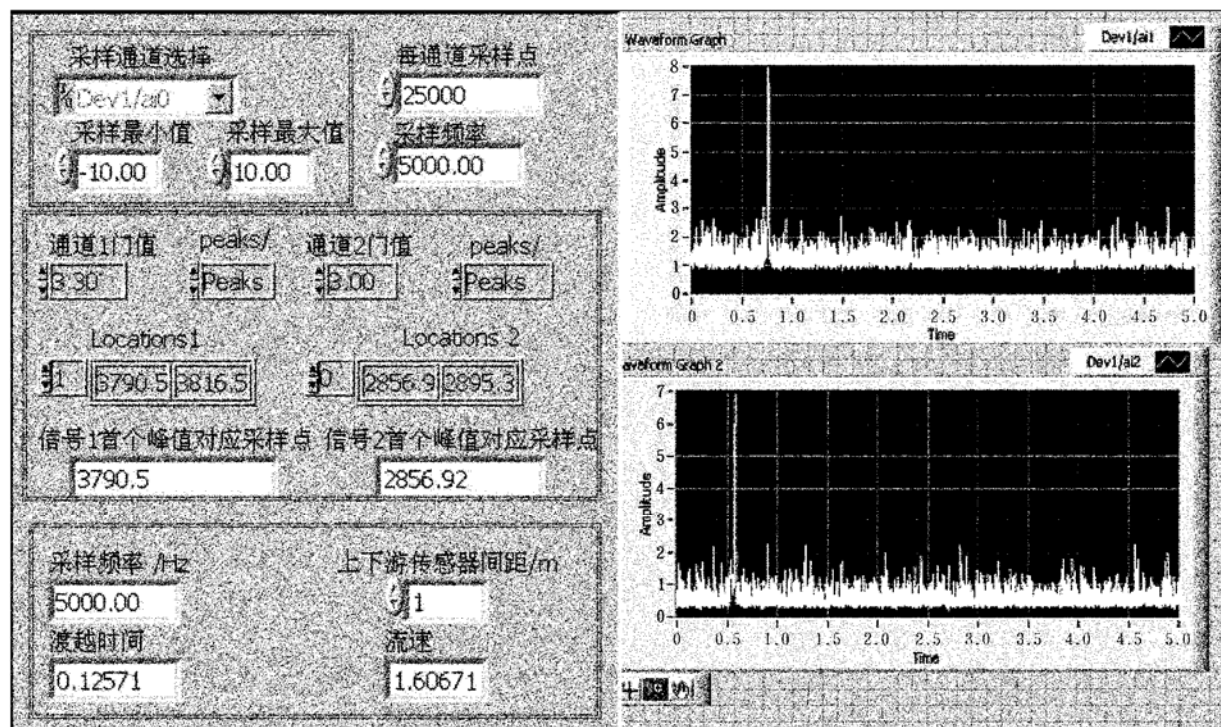


图4 测量系统前面板

Fig.4 Front panel of the virtual instrument for measurement

4 测量结果与分析

配制了泥沙含量为 0、50、150、250、350、400 kg/m³ 的水沙混合液, 分别在 0°、5°、10°、15°、20°、25° 坡度下研究粒子速度与径流速度的关系, 每个坡度下试验重复 5 次。

表 1 试验数据

Table 1 Experimental data

含沙量 /kg · m ⁻³	坡度 /(°)	粒子速度 /m · s ⁻¹	经验 系数	流量法流速 /m · s ⁻¹	示踪流速 /m · s ⁻¹	相对误差 /%
0	0	0.674	0.913	0.615	0.629	2.28
	5	1.222	0.932	1.139	1.140	0.11
	10	1.466	0.937	1.374	1.368	0.44
	15	1.712	0.939	1.607	1.597	0.60
	20	1.854	0.939	1.740	1.729	0.64
	25	2.174	0.938	2.040	2.028	0.59
50	0	0.558	0.924	0.515	0.521	1.17
	5	1.100	0.932	1.025	1.027	0.20
	10	1.560	0.933	1.455	1.455	0
	15	1.802	0.936	1.687	1.681	0.35
	20	2.052	0.938	1.925	1.915	0.52
	25	2.386	0.937	2.236	2.227	0.41
150	0	0.701	0.916	0.642	0.654	1.87
	5	1.323	0.926	1.225	1.234	0.73
	10	1.529	0.932	1.425	1.427	0.14
	15	1.738	0.937	1.629	1.621	0.49
	20	1.866	0.938	1.751	1.741	0.57
	25	2.069	0.941	1.947	1.928	0.98
250	0	0.761	0.917	0.698	0.710	1.77
	5	1.063	0.922	0.979	0.989	1.02
	10	1.385	0.938	1.299	1.292	0.52
	15	1.591	0.936	1.489	1.484	0.31
	20	1.852	0.942	1.719	1.702	1.00
	25	2.194	0.940	2.062	2.047	0.73
350	0	0.968	0.913	0.884	0.903	2.15
	5	1.335	0.926	1.236	1.246	0.81
	10	1.570	0.932	1.463	1.465	0.14
	15	1.748	0.935	1.634	1.630	0.25
	20	1.922	0.939	1.805	1.794	0.61
	25	2.179	0.944	2.057	2.033	1.17
400	0	0.864	0.913	0.788	0.806	2.29
	5	1.184	0.920	1.089	1.105	1.47
	10	1.469	0.928	1.364	1.371	0.48
	15	1.601	0.935	1.497	1.494	0.22
	20	1.824	0.946	1.725	1.702	1.33
	25	2.235	0.949	2.121	2.085	1.70

表 1 是对不同坡度及含沙量试验数据处理最终结果。测量系统在测定某个含沙量和坡度的流速时, 可同时测定粒子速度和流量法流速。目前对土壤侵蚀流速研究通常用流量法流速来标定^[9, 10, 20, 21], 流量法流速是指用流体体积与过流断面面积的比值来表征该体积流体通过截面的平均流速。在每次试验中待水槽中水流稳定后测定水槽的过流断面面积和最终蓄水池内水沙混合

液体积即可实现流量法测流速。用流量法来标定示踪法径流流速测量系统, 同时根据二者关系可以得到在该含沙量和坡度时经验系数 k 。将测量范围内所有的 k 取均值即为归一化经验系数 K 值, 用此 K 值与粒子速度相乘就是径流示踪速度。从表 1 可知系统在进行的试验中 k 值在 0.913 ~ 0.949 之间, 最终经验系数 $K = 0.933$ 。

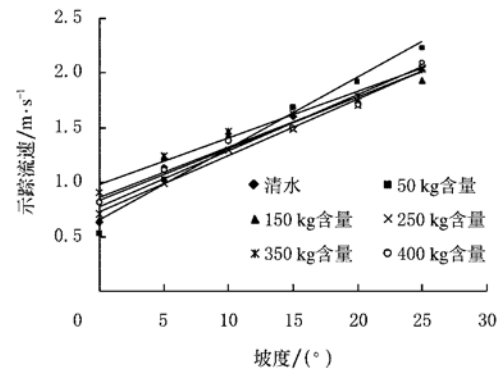


图 5 坡度与流速关系

Fig. 5 Relationship between runoff flow velocity and slope on different gradients

从图 5 可以看出, 含沙量在 0~ 400 kg/m³、坡度在 0~ 25° 范围内时, 示踪流速随着坡度增加而增大, 流速与坡度之间存在线性关系; 示踪流速随着泥沙含量的变化仍能够保持线性。采用归一化经验系数 K 测定的流速最大相对误差为 2.29%, 系统能够满足工程应用要求。

5 结 论

1) 开发了一套室内模拟坡面径流流速测量系统, 用该系统所进行的试验结果表明, 用光电传感器和示踪法测量径流流速是可行的。

2) 以聚苯乙烯泡沫粒子为示踪粒子, 克服了常用染色剂在流体中的扩散效应, 较为准确地测定了水流流速。

3) 设计的试验台能实现水沙循环使用, 流速变化范围可满足工程应用要求。

4) 通过试验得到了归一化的经验系数 K , 在一定含沙量和坡度下该经验系数可以认为是一个恒定值。

5) 当径流含沙量在 0~ 400 kg/m³、坡度在 0~ 25° 范围内, 测量系统最大相对误差为 2.29%。

6) 该测量系统为坡面径流流速的快速、准确测量提供了一种新的、有效的方法。

[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, 2001, 39(6): 882- 886.

- [2] 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, 2003, 16(1): 84– 86.
- [3] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dyes tracing[J]. Earthsurface Processes and Landforms, 1986, 11: 653 – 657.
- [4] 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.
- [5] Richardson S D, Willson C S, Rusch K A. Use of Rhodamine water tracer in the marshland upwelling system[J]. Ground Water, 2004, 42(5): 678– 688.
- [6] 石 辉. 小流域侵蚀产沙研究方法进展[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(3): 102– 108.
- [7] Ventura E, Nearing M A, Amore E, et al. The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer[J]. Catena, 2002, 48: 149– 161.
- [8] Ventura E, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion[J]. Catena, 2001, 43: 277– 291.
- [9] 夏卫生, 雷廷武, 赵 军. 泥沙含量对盐液示踪法经验公式系数影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 97– 100.
- [10] 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.
- [11] 刘青泉, 陈 力, 李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学与力学, 2001, 22(5): 449– 457.
- [12] Woolhiser D A, Hanson G L, Kuhlman A R. Overland flow on rang land watersheds[J]. Joural Hydrology, 1970, 19(2): 187– 204.
- [13] Song S, Eaton J K. Reynolds number effects on a turbulent boundary layer with separation, reattachment, and recovery[J]. Experiment in Fluids, 2004, 36: 246– 258.
- [14] Masayoshi Okamoto, Nobuyuki Shima, Gatski T B. Theoretical investigation of an Eddy-Viscosity-Type expression of the Reynolds stress with Low-Reynolds-Number effect[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2003, 16: 369– 385.
- [15] Eloranta H, Parssinen T, Saarenrinne P, et al. On the fluid structure interaction of a splitter plate vibration modes and Reynolds number effects[J]. Experiments in Fluids, 2006, 41: 67– 77.
- [16] Oyewola O, Djenidi L, Antonia R A. Influence of localised wall suction on the anisotropy of the Reynolds stress tensor in a turbulent boundary layer[J]. Experiments in Fluids, 2004, 37: 187– 193.
- [17] 李阿梅, 袁旭音, 乔 磊. 水系物质迁移过程示踪及其在环境中的应用[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 196– 200.
- [18] 王剑平, 王 俊, 应义斌, 等. 农产品薄层干燥试验微机控制及数据采集系统[J]. 浙江农业大学学报, 1998, 24(2): 148– 152.
- [19] 王剑平, 盖 玲, 王 俊. 农业物料碰撞特性试验数据采集系统[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 150– 153.
- [20] 高佩玲, 雷廷武, 邵明安. 小流域土壤侵蚀及径流过程自动测量系统的实验应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 164– 166.
- [21] 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, 2001, 14(6): 781– 784.

Runoff flow velocity measurement system using photoelectric sensor and tracing method

Liu Peng, Li Xiaoyu^{*}, Wang Wei

(College of Engineering and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The velocity of slope runoff flow is an important parameter to evaluate soil erosion, and it is also a key factor in the soil erosion forecast. A runoff flow velocity measurement system based on LabVIEW was developed, which consisted of test-bed, photoelectric sensor, data acquisition card, measuring and controlling software. The experiment was completed in room simulation test-bed using foam particle as a tracer. The result indicates that the test-bed can recycle water and soil. The system measures runoff flow velocity accurately at the scope of 0~400 kg/m³ and 0~25° of slope gradient. It is found that the greatest relative error of the system is 2.29%. This measurement system provides a new, valid method for speedy and accurate measurement of runoff flow velocity.

Key words: runoff flow; photoelectric sensor; tracing method; velocity of flow; LabVIEW