

# 基于统计理论数据融合的水流泥沙含量测量仪

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

(1. 华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070; 2 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 水流泥沙含量的测量在土壤侵蚀和水土保持研究中具有重要意义。采用自行研制的便携式水流泥沙含量测量仪测量了水流泥沙含量。结果表明, 水流泥沙混合液质量与泥沙含量之间呈线性关系, 可采用荷重传感器测量水流泥沙含量; 通过采用基于统计理论的数据融合方法来处理测量结果, 可大大提高测量的准确性和重复性; 其测量精度为 0.63%, 重复性误差小于 0.49%; 该测量系统为水流泥沙含量的快速、准确测量提供了一种新的、有效的方法。

**关键词:** 统计理论; 数据融合; 泥沙含量; 荷重传感器; 测量仪

中图分类号: TP202

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0110-04

## 0 引言

在土壤侵蚀研究与水土流失治理中, 水流中泥沙含量的测量具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。长期以来, 国内外测定水流泥沙含量普遍使用的仍然是传统的“烘干称重法”<sup>[4]</sup>。这种方法虽然精度较高, 但测量周期长、检测过程繁琐, 劳动强度大。本文用自行研制的便携式水流泥沙含量测量仪(专利号: ZL 00226705.5)测量了水流泥沙含量, 结果表明, 这一方法具有可行性。

在传统的测量过程中, 所检测对象的差异、进行检测的条件以及检测人员的不同等各种因素的随机性, 均影响仪器的准确性和重复性。而检测信号的处理方法可显著提高测量仪器的精度。

本文研究了基于统计理论的数据融合方法, 用单传感器重复采样, 不要求测量数据所服从的分布和相应的概率密度函数等先验知识, 仅依据传感器所提供的有限次测量数据, 就可计算出均方误差最小的水流泥沙含量的测量结果<sup>[5-7]</sup>, 使测量的准确性和可重复性大大提高。

## 1 测量原理与试验方法

### 1.1 测量系统的设计原理

泥沙与水的混合是固液两相的混合, 由于泥沙与水的密度不同, 采用荷重传感器测量, 可将测得泥沙混合液质量的变化转换成泥沙含量的变化。图1是依据上述原理而设计的水流泥沙含量测量仪的原理框图。由测量筒提取单位体积的泥沙混合液, 经荷重传感器将该测量值转化为电信号, 电信号通过变换电路放大处理后再经过A/D转换器进入计算机。通过计算机对测量数据进行融合处理, 以为进一步的单片机系统的数据处理提供有效的科学依据。

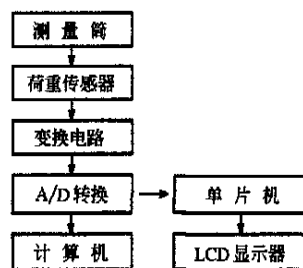


图1 测量系统原理框图

Fig 1 Principle diagram of system of measuring sediment concentration

### 1.2 试验材料与方法

被试土样取自陕西省安塞地区, 为黄绵土。将土样和水配制成含沙量为 0, 50, 100, 150, ……、950, 1000  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 21 组标准浓度的泥沙混合液, 在不同浓度下(共 21 个水平)重复 10 次标定单位体积(每升)泥沙混合液质量与泥沙含量之间的输入—输出特性。见表 1。

通过标定试验数据的回归分析, 可知水流泥沙混合液质量与泥沙含量之间呈线性关系

$$y = 1.606x - 1628.984$$

$$F = 37386.78 \gg F_{0.01}(1, 19) = 8.18$$

式中  $x$ ——泥沙混合液质量,  $\text{kg}$ ;  $y$ ——泥沙含量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

经检验, 该回归方程高度显著。

故该测量系统可将水流泥沙混合液质量的变化转换为泥沙含量的变化。

## 2 基本理论

通常进行现场泥沙含量的测定, 随机采样得出—测量列, 然后计算出被测样品的泥沙含量均值。当测量次数较多时, 测量列的算术平均值是最理想的测量结果示值。但现场测量往往要求在较短的时间内, 通过较少次数的测量, 得到被测样品的结果。于是在测量次数较少时, 算术平均值的准确性和重复性受到限制, 不再是最理想的测量结果, 而基于统计理论的数据融合方法可以获得更准确的测量结果。

收稿日期: 2003-09-10 修订日期: 2004-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40171062); 中国科学院“引进国外杰出人才”项目(982602); 中国科学院水利部西北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项目(10501-92)

作者简介: 李小昱, 女, 教授, 博士生导师; 主要从事智能化检测与控制技术、机械设计及理论等方面的教学与研究。湖北省武汉市狮子山街特1号 华中农业大学工程技术学院, 430070

表 1 不同浓度下的单位体积(每升)泥沙混合液质量

Table 1 Weight of a liter of sediment liquor under different concentration

kg · L<sup>-1</sup>

泥沙含量 /kg · m <sup>-3</sup>	测 量 次 数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	1.0082	1.0088	1.0093	1.0109	1.0129	0.9948	1.0117	1.0107	1.0093	1.0116	1.0088
50	1.0471	1.0474	1.0517	1.0462	1.0485	1.0530	1.0448	1.0430	1.0489	1.0520	1.0483
100	1.0789	1.0734	1.0746	1.0802	1.0688	1.0864	1.0768	1.0777	1.0814	1.0785	1.0777
150	1.1057	1.1043	1.1051	1.1052	1.1084	1.1067	1.1024	1.1065	1.1020	1.1027	1.1049
200	1.1380	1.1351	1.1374	1.1377	1.1372	1.1302	1.1256	1.1428	1.1406	1.1360	1.1361
250	1.1621	1.1716	1.1731	1.1732	1.1737	1.1650	1.1687	1.1660	1.1686	1.1795	1.1701
300	1.1934	1.1993	1.2009	1.2061	1.2132	1.2022	1.2049	1.2104	1.2054	1.2038	1.2040
350	1.2337	1.2374	1.2330	1.2380	1.2338	1.2343	1.2269	1.2397	1.2343	1.2355	1.2347
400	1.2701	1.2725	1.2706	1.2609	1.2671	1.2640	1.2709	1.2627	1.2638	1.2646	1.2667
450	1.2976	1.2941	1.2904	1.2994	1.3008	1.2948	1.2908	1.2928	1.2941	1.2987	1.2953
500	1.3209	1.3270	1.3268	1.3229	1.3243	1.3250	1.3268	1.3220	1.3266	1.3278	1.3250
550	1.3561	1.3588	1.3607	1.3602	1.3584	1.3485	1.3581	1.3554	1.3537	1.3488	1.3559
600	1.3934	1.3981	1.3980	1.3984	1.4027	1.4027	1.3920	1.4007	1.4015	1.3922	1.3980
650	1.4209	1.4255	1.4275	1.4346	1.4276	1.4285	1.4259	1.4288	1.4326	1.4253	1.4277
700	1.4513	1.4430	1.4536	1.4498	1.4542	1.4568	1.4555	1.4583	1.4579	1.4573	1.4538
750	1.4789	1.4815	1.4791	1.4821	1.4731	1.4803	1.4746	1.4701	1.4776	1.4710	1.4768
800	1.5113	1.5022	1.5091	1.5050	1.5102	1.5017	1.5075	1.5092	1.5043	1.5058	1.5066
850	1.5370	1.5445	1.5422	1.5439	1.5461	1.5377	1.5398	1.5445	1.5426	1.5395	1.5418
900	1.5754	1.5654	1.5687	1.5708	1.5752	1.5704	1.5714	1.5714	1.5714	1.5713	1.5711
950	1.6121	1.6054	1.6051	1.6117	1.6062	1.6091	1.6160	1.6084	1.6089	1.6098	1.6093
1000	1.6323	1.6293	1.6302	1.6348	1.6323	1.6347	1.6352	1.6330	1.6300	1.6370	1.6329

传统的泥沙含量的误差处理是按等精度测量来考虑的,认为测量仪器、测量条件和测量人员是基本不变的,采样数据具有同等精度。但实际现场测量过程中,各种随机因素的影响,使传感器的每次输出成为不等精度的测量结果。对于不等精度的测量数据,精度高的数据误差小,加权因子应大;精度低的数据误差大,加权因子应小。因此,对于不等精度测量所得到的数据,正确地给定加权因子是非常重要的<sup>[8]</sup>。

基于统计理论的数据融合方法的基本思想<sup>[5-7,9-11]</sup>是以单传感器重复采样的测量列  $M_1, M_2, \dots, M_n$  ( $n$  有限)的加权融合值  $\bar{M}$  为结果示值。测量列的每个数据都有相应的加权因子  $W_1, W_2, \dots, W_n$ , 在总均方误差最小这一最优条件下,根据各个测量值以自适应的方式寻求其对应的最优加权因子,使融合后的  $\bar{M}$  达到最优。

加权因子引入后,水流泥沙含量测定的加权平均值为

$$\hat{M} = \sum_{i=1}^n W_i M_i \quad (1)$$

而 
$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (2)$$

总均方误差为 
$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n W_i^2 \sigma_i^2 \quad (3)$$

式(3)中是各加权因子  $W_i$  的多元二次函数,根据多元函数求极值的理论,利用拉格朗日乘数法,可求出总均方误差最小时所对应的加权因子为

$$W_i = 1 / \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

此时所对应的最小均方误差为

$$\sigma_{in}^2 = 1 / \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \right) \quad (5)$$

所以,根据式(4)可求出各测量数据的对应权数,再通过加权平均计算,就可获得一组测量数据最小方差的测量结果。若有  $k$  组这样的测量数据,设  $k$  组数据的均值为

$$\bar{M}(k) = \frac{1}{k} \sum_{q=1}^n M_q \quad (k = 2, 3, 4, \dots) \quad (6)$$

则此时水流泥沙含量的融合值为

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^k W_i \bar{M}_i(k) \quad (7)$$

式中  $\bar{M}_i(k)$  —— 为  $k$  组数据中第  $i$  组数据在其方差最小时的测量结果。

$k$  组数据取算术平均值后的总均方差为

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n W_i^2 \sigma_i^2 \quad (8)$$

同理,可以由多元函数求极值理论求出  $\bar{\sigma}_{in}^2$ , 并据此确定最优加权因子  $W$ 。由式(5)、(8)得到

$$\bar{\sigma}_{in}^2 = \frac{1}{k \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} = \frac{\sigma_{in}^2}{k} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,  $\bar{\sigma}_{in}^2$  一定小于  $\sigma_{in}^2$ , 并且  $\bar{\sigma}_{in}^2$  将随  $k$  的增加而进一步减小。

那么测定水流泥沙含量所采用的统计理论数据融合方法的步骤为:

- 1) 计算出  $\sigma_i^2$ ;
- 2) 求出每组数据方差最小时的结果  $\bar{M}_i(k)$ ;
- 3) 根据式(4) 求出最优加权因子  $W_i$ ;
- 4) 根据式(7) 计算出数据融合值  $\bar{M}$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于统计理论的数据融合方法

分别在 0, 50, 100, 150, ..., 950, 1000 kg · m<sup>-3</sup> 21 个水平下, 每个水平重复 10 次测量泥沙含量。

首先用 10 次测量值的算术平均值法求泥沙含量的结果示值。而在使用数据融合法时采用以下两种方法:

方法 1: 依次取前 6 个测量数据, 对历史数据累计分组, 如在得到第一组数据  $x_1, x_2$  后, 再测量得到数据  $x_3$ , 把它与历史数据  $x_1, x_2$  合并作为第二组数据  $x_1, x_2, x_3$ , 以此类推, 可以得到 5 组数据, 然后对每组数据融合处理, 将每组数据融合处理后的结果作为新的一组再次进行融合处理。

方法 2: 将测量的原始数据(每个水平取 9 个数据)分为 3 组, 每组 3 个数据, 然后将每组数据融合处理得到的结果组成新的一组, 再次对这 3 组数据进行融合处理。

#### 3.2 不同数据处理方法精度的对比

采用算术平均值算法与 2 种数据融合方法的结果如表 2, 表中的误差均为绝对误差。

表 2 不同算法下泥沙含量的测量结果

Table 2 Measured result of sediment concentration under different calculating methods kg · m<sup>-3</sup>

泥沙含量	算术平均值法		方法 1		方法 2	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差
0	- 9.03	- 9.03	- 8.93	- 8.93	- 7.40	- 7.40
50	54.33	4.33	53.55	3.55	53.39	3.39
100	101.54	1.54	99.07	- 0.93	101.76	1.76
150	145.28	- 4.72	145.77	- 4.23	145.55	- 4.45
200	195.32	- 4.68	196.99	- 3.01	197.46	- 2.54
250	250.04	0.04	251.75	1.75	251.45	1.45
300	304.34	4.34	297.56	- 2.44	306.30	6.30
350	353.63	3.63	353.48	3.48	353.01	3.01
400	405.12	5.12	410.33	10.33	402.09	2.09
450	451.07	1.07	451.84	1.84	449.37	- 0.63
500	498.73	- 1.27	497.64	- 2.36	500.31	0.31
550	548.28	- 1.72	552.56	2.56	551.46	1.46
600	615.86	15.86	615.18	15.18	619.19	19.19
650	663.67	13.67	661.54	11.54	664.86	14.86
700	705.48	5.48	699.29	- 0.71	706.10	6.10
750	742.49	- 7.51	746.62	- 3.38	746.03	- 3.97
800	790.36	- 9.64	791.17	- 8.83	791.69	- 8.31
850	846.80	- 3.20	847.45	- 2.55	848.14	- 1.86
900	893.95	- 6.05	892.66	- 7.34	893.70	- 6.30
950	955.19	5.19	953.26	3.26	954.59	4.59
1000	993.12	- 6.88	991.24	- 8.76	993.31	- 6.69

表 2 的结果表明: 若以绝对误差为衡量指标, 在测量的 21 个水平中, 数据融合方法 1 的结果有 14 个数据优于算术平均值法, 即有 66.7% 的数据精度更高且测量数据仅用前 6 次原始数据; 数据融合方法 2 的结果有 14 个数据优于算术平均值法, 即有 66.7% 的数据精度更高, 并且有 13 个数据优于方法 1, 即 61.9% 的数据精度较方法 1 更高且测量数据用前 9 次原始数据。据此, 可知数据融合方法 2 的结果精度更高, 则确定采用数据

融合方法 2。同时可知, 两种数据融合法的测量数据均少于 10 次测量值的算术平均值法, 而精度更高。

为了进一步分析数据处理的精度, 计算出数据算术平均值与数据融合方法 2 所得结果的方差与变异系数, 见表 3。

表 3 两种算法的方差和变异系数

Table 3 Variance and variation coefficient of two calculating methods

泥沙含量 /kg · m <sup>-3</sup>	平均值 /kg · m <sup>-3</sup>	方差	变异系数/%	融合值 /kg · m <sup>-3</sup>	方差	变异系数/%
0	- 9.03	8.276	91.650	- 7.40	1.710	23.108
50	54.33	5.233	9.632	53.39	5.574	10.441
100	101.54	7.693	7.576	101.76	0.003	0.003
150	145.28	3.351	2.307	145.55	4.688	3.221
200	195.32	7.962	4.076	197.46	4.591	2.325
250	250.04	8.152	3.260	251.45	5.227	2.079
300	304.34	8.972	2.948	306.30	1.206	0.394
350	353.63	5.611	1.587	353.01	0.002	0.001
400	405.12	6.530	1.612	402.09	1.184	0.295
450	451.07	5.814	1.289	449.37	2.921	0.650
500	498.73	3.831	0.768	500.31	0.399	0.080
550	548.28	7.011	1.279	551.46	4.856	0.881
600	615.86	6.645	1.079	619.19	0.001	0.000
650	663.67	6.208	0.935	664.86	0.680	0.102
700	705.48	7.550	1.070	706.10	7.057	0.999
750	742.49	6.982	0.940	746.03	8.786	1.178
800	790.36	5.367	0.679	791.69	0.020	0.002
850	846.80	4.969	0.587	848.14	0.035	0.004
900	893.95	4.617	0.516	893.70	0.825	0.092
950	955.19	5.418	0.567	954.59	1.142	0.120
1000	993.12	4.066	0.409	993.31	0.041	0.004

由表 3 可知, 数据融合法得到的结果只有在泥沙含量为 50, 150, 750 kg · m<sup>-3</sup> 3 个水平时的变异系数大于算术平均值法的变异系数, 并且数据融合法的变异系数在 1% 以内占 71.4%, 而算术平均值法只有 38.1%。可知采用数据融合法的结果明显优于算术平均值法, 其测量精度为 0.63%, 重复性误差小于 0.49%。

### 4 结论

1) 水流泥沙混合液质量与泥沙含量之间呈线性关系, 这为采用荷重传感器测量水流中的泥沙含量提供了理论依据, 为测量系统变换电路的设计提供了技术参数。

2) 基于统计理论的数据融合法的测量次数少, 但测量结果明显优于算术平均值法, 使测量结果的准确性和重复性大大提高, 这也为单片机系统数据处理的方法提供了科学的依据。

3) 采用荷重传感器测量水流泥沙含量, 并以基于统计理论的数据融合法处理测量结果, 这为水流泥沙含量的快速、准确测量提供了一种新的、有效的方法。

#### [参 考 文 献]

[1] 姜乃森 我国的水土流失与防治[J] 泥沙研究, 1997, (2): 83- 86  
 [2] 唐克丽 中国土壤侵蚀与水土保持学的观点及展望[J] 水

- 水土保持研究, 1999, 6(2): 2- 7.
- [3] 郑粉莉 浅谈我国土壤侵蚀学科亟待加强的研究领域[J] 水土保持研究, 1999, 6(2): 26- 31.
- [4] 方彦军, 张红梅, 程 英 含沙量研究的新进展[J] 武汉水利水电大学学报, 1999, 32(3): 55- 57.
- [5] 滕召胜 基于自适应加权数据融合的粮食水分快速测定仪[J] 农业机械学报, 1999, 30(6): 64- 67.
- [6] 翟翌立, 戴逸松 多传感器数据自适应加权融合估计算法的研究[J] 计量学报, 1998, 19(1): 69- 75.
- [7] 滕召胜, 罗隆福, 童调生 智能检测系统与数据融合[M] 北京: 机械工业出版社, 2000, 202- 203.
- [8] 费业泰 误差理论与数据处理(第 4 版)[M] 北京: 机械工业出版社, 2001, 10- 57.
- [9] 罗中良, 方清城, 张前进 一种多传感器数据融合方法及应用[J] 传感器技术, 2002, 21(2): 27- 32.
- [10] 阙渭焰, 彭应宁 检测数据融合算法分析[J] 电子科学学刊, 1997, 19(3): 393- 401.
- [11] 涂国平, 叶素萍 一种传感器数据的融合算法[J] 传感器技术, 2003, 22(3): 30- 32.

## Intelligent instrument for measuring sediment concentration in flow-water based on data fused method of statistic theory

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

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

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** It is very important to measure sediment concentration in flow-water on studying on soil erosion and soil and water conservation. A new portable instrument was adopted to measure the sediment concentration. The result showed that the sediment concentration in flow-water was in linear correlation with the mass of mixed liquor. Weight sensor can measure the sediment concentration. Adopting data fusion method based on statistics theory to handle measurement result can greatly improve the measurement accuracy and minimize the repeat error. The measurement accuracy is 0.63% and the repeat error is 0.49%. This measurement system provides a new, valid method to speed the procedure and correct the measurement of sediment concentration in flow-water.

**Key words:** statistic theory; data fusion; sediment concentration; weight sensor; measuring instrument