

电容式传感器测量水流泥沙含量的研究*

李小昱^{1,2} 雷廷武^{1,3} 王 为²

(1 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, 陕西杨陵 712100)

(2 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨陵 712100)

(3 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要 首次提出了电容法测量水流含沙量的测量方法, 并研制了两种结构形式的电容传感器, 尝试测量了水流中泥沙含量与传感器输出间的关系, 以及温度、径流流速、土壤种类、土壤含盐量对传感器响应特性的影响。结果表明, 水流泥沙含量与传感器的输出呈线性关系; 传感器的输出随温度的升高而逐渐增大; 流速、土壤种类、土壤含盐量对传感器的输出影响较小。

关键词 电容式传感器, 含沙量, 温度, 流速, 土壤种类, 含盐量

中图分类号 P333.4

我国是世界上水土流失最严重的国家之一, 这不仅破坏了农田, 而且加速了土地的退化, 使土壤日益贫瘠, 抗灾能力日益降低。我国许多河流已成为世界上著名的多泥沙河流, 这给治河兴利带来一系列问题。这种状况直接影响了农业生产并将继续影响农业的持续稳定发展。

据水利部遥感中心 1990 年的调查, 全国各类土壤侵蚀总面积达 367 万 km^2 , 占全国总土地面积的 38.2%, 其中轻度以上水蚀面积达 179 万 km^2 [1]。

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。它可为土壤侵蚀动力过程的模拟与研究、土壤侵蚀预报模型的建立等提供基础资料, 为监测和预报水土流失过程、及时准确地控制水土流失的决策提供科学依据。

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” [2]。这种方法测量周期长、检测过程繁琐、劳动强度大, 不能很好的监测水流的动态过程。因此, 水流泥沙含量的准确、快速、在线测量便成了亟待解决的问题。

传统观点认为 [3], 用电容式传感器作含水率的敏感元件, 在低含水率段有良好的工作特性, 且多用于固态物料水分的测量。当含水率超过 30% ~ 50% 时, 由于大量导电离子水构成两电容极板间的导体, 从而失去对含水率的分辨能力, 也没有用电容式传感器进行水流泥沙含量测量的先例。这是因为被测介质为液态水流, 其电磁特性以及各种因素的

* 中国科学院引进国外杰出人才基金, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室科研专项基金和西北农林科技大学科研专项基金资助项目

干扰与影响更加难以解决。本研究尝试用电容法测量水流泥沙含量,并用自行研制的电容式传感器进行试验,研究准确、快速、连续、在线的测量水流中泥沙含量的可行性。

1 测量原理

泥沙与水的混合实际上是固液两相的统计混合物,利用泥沙与水的混合物引起的介电常数差异的电物理特性,采用变介电常数电容式传感器原理,可将被测的泥沙含量的变化转换成电容量的变化。

2 电容传感器的结构

自行研制了平板式与同轴圆筒式两种结构形式的电容传感器,其结构示意图如图 1 所示。由于水在低频电场中为电的良导体^[4],故电极之一覆盖一层薄绝缘介质,消除含水导电效应。同时为了减少外界信号的干扰,电极系统加屏蔽,信号传输线路采用屏蔽电缆。

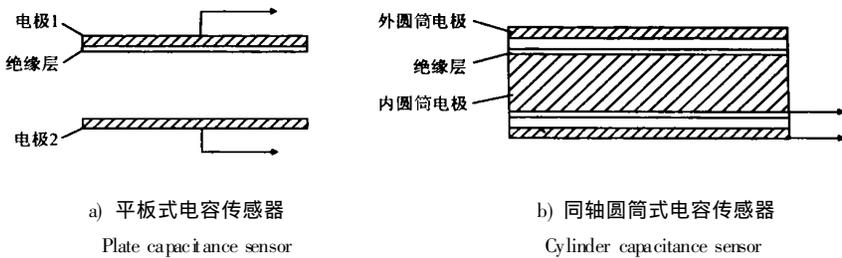


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structure of the sensor

3 试验设计与方法

3.1 试验材料

被试土样采自西北农林科技大学农作一站(中壤土)和农作二站(沙壤土),将土样和水配制为质量百分比(土壤质量/混合物总质量 $\times 100\%$)为 0、10%、20%、30%、40%……90%的混合物。

试验时将传感器浸入悬浮液中。因本试验初探泥沙含量与电容传感器响应之间的关系,以为进一步研究提供理论依据与技术数据,所以其输出(电容)用数字电容表测取。

3.2 试验设计

为了研究不同因素对电容式传感器输出的影响,分别设定 5 个试验。

试验 1: 水流中泥沙含量与电容式传感器响应特性间的关系。分别采用两种不同结构形式的传感器,试样用中壤土,水流泥沙含量取 0、10%、20%、30%、40%……90%,共 10 个水平,5 次重复。

试验 2: 温度对传感器输出的影响。由于水的介电常数对于温度的变化非常灵敏^[5],这就导致传感器的电容量将随被测物温度的变化而变化。分别采用两种不同结构形式的传感器,用 5% 的混合液,选取温度为 0、5、10、15、20……40℃,共 9 个水平,5 次重复。

试验 3: 径流流速对传感器输出的影响。考虑到不同流速可能会影响悬浮液中分散颗粒的分布状

况,进而影响混合液的介电常数。为此,采用两种不同结构形式的传感器,分别用水与 10% 的混合液,取流速为 0、0.73、1、1.26、1.45、1.62、1.78、1.85、2ms⁻¹,共 9 个水平,5 次重复。

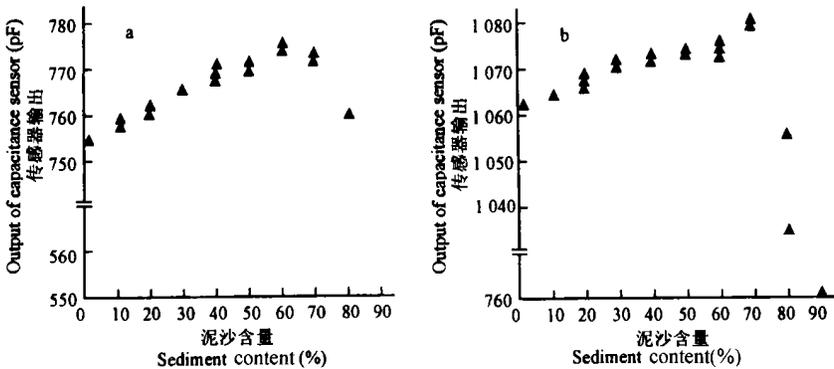
试验 4: 土壤种类对传感器输出的影响。考虑到不同土壤质地可能会导致其介电常数有所不同^[6],采用两种不同结构形式的传感器,分别用中壤土和沙壤土、泥沙含量分别取 0、10%、20%、30% …… 70%,共 8 个水平,5 次重复。

试验 5: 土壤含盐量对传感器输出的影响。通过加 NaCl,配制土壤含盐量为 0、0.5、1、1.5、2 …… 5g L⁻¹,共 11 个水平,5 次重复。

4 结果与分析

4.1 水流泥沙含量与传感器输出的关系

测得的平板式与同轴圆筒式两种结构形式电容传感器对泥沙含量的响应特性如图 2。由试验数据可知,虽然两种传感器的结构形式不同,但传感器对泥沙含量的响应曲线的变化趋势是一致的,仅两种传感器的初始值不同而异。当泥沙含量小于 70%,传感器的输出呈上升趋势,而当超出这一临界点,传感器的输出呈下降趋势。根据电介质物理学^[3],对被测固液两相的混合物施加一个垂直于其表面的电场,物质与水相对于电场既有并联又有串联,且并联率系数与体积含水率有关。从试验过程中也可知,当泥沙含量小于 70% 时,水呈连续相,为流动状态;当泥沙含量大于 70% 时,混合物已为非流动状态。说明当水以游离水与结合水两种形式存在于泥沙中,其混合物的等效介电常数会出现不同的响应。泥沙含量大于 70% 时,传感器的输出虽呈下降趋势,但仍呈线性关系,与文献 [7] 中用电容式传感器测土壤水分的响应特性的变化趋势是一致的,也与通常用电容式传感器测固体物料水分的响应特性相符^[8]。



泥沙含量与平板式电容传感器输出的关系
Relationship of sediment concentration
with output of plate capacitance sensor

泥沙含量与同轴圆筒式电容传感器输出的关系
Relationship of sediment concentration
with output of cylinder capacitance sensor

图 2 电容式传感器对泥沙含量的响应特性

Fig.2 Response properties of capacitance sensor

据文献 [9] 知,稀性泥石流的泥沙含量为 800~1 200kg m⁻³,那么试验中当泥沙含量的质量百分比为 70% 时,已相当于泥沙含量为 1 150kg m⁻³,从工程实用的角度,仅考虑泥

沙含量 ≤ 70% 即可。据此,重新设计了一个试验,水流泥沙含量分别取 0、10%、20%、30%70% 共 8 个水平,5 次重复。

由试验数据可知平板式电容传感器的非线性误差为 0.20%, 重复性误差为 0.13%; 同轴圆筒式电容传感器的非线性误差为 0.10%, 重复性误差为 0.10%。泥沙含量 X 与传感器输出 Y 间的关系为:

平板式电容传感器 $Y = 757.25 + 0.239X, R = 0.945, F = 285.34, n = 8$

同轴圆筒式电容传感器 $Y = 1063.00 + 0.201X,$
 $R = 0.979, F = 285.26, n = 8$

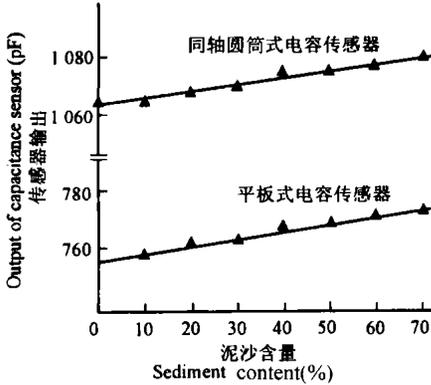


图 3 泥沙含量与电容式传感器输出的关系
Fig. 3 Relationship of sediment concentration with output of capacitance sensor

$R_{0.01} = 0.834, F_{0.01} = 13.75$

经检验,其回归方程极为显著。

两种不同结构参数的传感器响应特性如图 3。

由图中可知,二者的斜率即传感器的灵敏度相近,平板式电容传感器略高(即当泥沙含量为 1% 时,其传感器输出为 0.239pF)。用电容变换电路是可以达到该分辨率的,且工程中一般只需分辨泥沙含量为 5% 即可。

4.2 温度对传感器输出的影响

据试验数据作出两种结构形式的传感器输出随温度变化的曲线如图 4、图 5。曲线表明,随着温度的上升传感器的输出逐渐增大。文献介绍,介电

常数与温度有近似线性的正相关^[10],试验结果恰好说明了这一点。从电介质的极化的过程看,电子式极化受温度影响不大,而离子极化具有正的温度系数。偶极子在常温下,随着温度的升高,介电常数逐渐增大。所以总的来说,传感器的输出 Y 随温度 X 的升高而逐渐增大,二者之间的关系为:

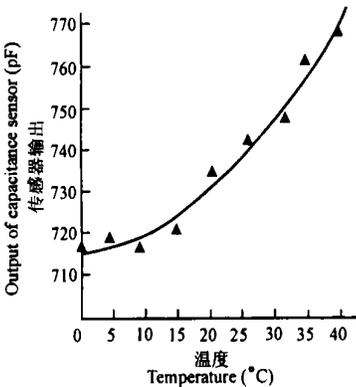


图 4 温度对平板式传感器输出的影响
Fig. 4 Influence of temperature on output of plate capacitance sensor

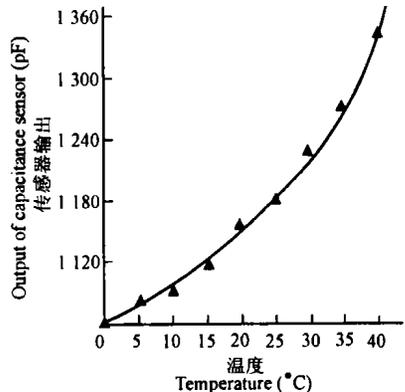


图 5 温度对同轴圆筒式传感器输出的影响
Fig. 5 Influence of temperature on output of cylinder capacitance sensor

平板式电容传感器 $Y = 714.85 + 0.035X^2, R = 0.984, F = 497.75, n = 9$

同轴圆筒式电容传感器 $Y = 1061.52 + 0.191X^2, R = 0.956, F = 287.25, n = 9$

$R_{0.01} = 0.798 \quad F_{0.01} = 12.25$

经检验, 回归方程极为显著。

4.3 流速对传感器输出的影响

由试验结果知, 当流速从 $0 \sim 2 \text{ m s}^{-1}$ 时, 无论是水还是含有 10% 泥沙的混合液, 两种结构形式的传感器的输出特性都不受流速的影响。

4.4 土壤种类对传感器输出的影响

用中壤土和沙壤土两种土样配制混合液, 分别采两种结构形式的传感器进行了试验。

从试验结果知, 不同土壤种类对电容传感器的输出影响很小。对数据进行回归分析, 当土壤种类不同时, 水流泥沙含量 X 与传感器输出 Y 之间的关系为:

平板式电容传感器 中壤土 $Y = 757.25 + 0.239X, R = 0.945, F = 285.34, n = 8$

沙壤土 $Y = 757.00 + 0.257X, R = 0.988, F = 405.00, n = 8$

同轴圆筒式电容传感器 中壤土 $Y = 1063.00 + 0.201X, R = 0.979, F = 285.26, n = 8$

沙壤土 $Y = 1062.57 + 0.257X, R = 0.931, F = 267.50, n = 8$

$R_{0.01} = 0.834 \quad F_{0.01} = 13.75$

经检验, 其回归方程极为显著。

4.5 土壤含盐量对传感器输出的影响

据试验数据作出两种结构形式的传感器输出随土壤含盐量的变化特性如图 6。

由图可知, 土壤含盐量对传感器的输出有一定影响, 随着土壤含盐量的增大, 传感器的输出随之增大。对非盐渍土 ($\text{NaCl} < 2 \text{ g L}^{-1}$) 采用统一标定曲线, 其误差在 $\pm 0.3\%$ 以内; 而对盐渍土 ($\text{NaCl} > 2 \text{ g L}^{-1}$), 采用统一标定曲线, 其误差在 $\pm 1.1\%$ 以内。

5 结 论

1. 首次提出了用电容式传感器测量水流泥沙含量的方法, 用研制的电容式传感器所进行的试验结果表明, 这一方法具有可行性。

2. 当水流中泥沙含量 $\leq 70\%$, 即 $0 \sim 1150 \text{ kg m}^{-3}$ 时, 泥沙含量与传感器的输出呈线性关系, 且随泥沙含量的增大, 传感器输出随之增加。两种不同结构形式与参数的传感器灵敏度相近, 但结构形式与参数的不同影响传感器的输出量程, 故可通过改变传感器的结构参数来增大传感器的输出, 从而提高测量精度。

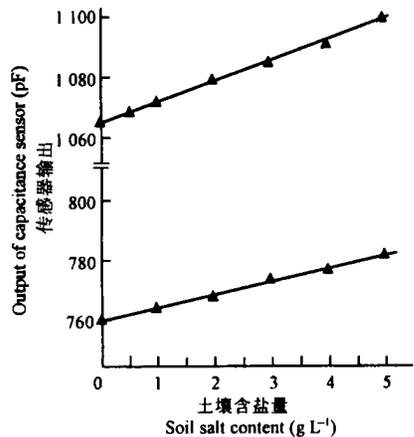


图 6 土壤含盐量对电容式传感器输出的影响

Fig. 6 Influence of soil salt on output of capacitance sensor

3. 当水流中泥沙含量 $> 70\%$, 即 $> 1150\text{kg m}^{-3}$ 时, 传感器输出随泥沙含量的增大而减小, 但仍呈线性, 那么该传感器也适用于土壤含水量以及其它固体物料含水量的测量, 但该项工作还有待于做进一步的深入研究。

4. 传感器的输出随温度的升高而逐渐增大, 二者呈近似线性关系。

5. 在 $0\sim 2\text{m s}^{-1}$ 的径流流速下, 传感器的输出不受流速的影响。

6. 不同土壤种类对传感器的输出影响很小, 若需较高的测量精度, 可在测试中对每种土壤进行标定。

7. 随着土壤含盐量的增大, 传感器的输出随之增大。对非盐渍土($\text{NaCl} < 2\text{g L}^{-1}$)采用统一标定曲线, 其误差在 $\pm 0.3\%$ 以内; 而对盐渍土($\text{NaCl} > 2\text{g L}^{-1}$)采用统一标定曲线, 其误差在 $\pm 1.1\%$ 之内。

参 考 文 献

1. 姜乃森. 我国的水土流失与防治. 泥沙研究, 1997, (2): 83~ 86
2. 方彦军, 张红梅, 程瑛. 含沙量的新进展. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(3): 55~ 57
3. 单成祥. 传感器理论与设计基础及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1999. 479~ 481
4. 庄海军, 刘兴斌, 梅艳. 一种测量油井产液含水率的电容传感器. 传感器技术, 1997, 16(2): 39~ 41
5. 肖慧荣. 多极探针型电容式水分传感器. 传感器技术, 1997, 16(1): 47~ 49
6. 石文茂, 胡显华, 刘雅娟等. 土壤温湿度测量仪的研制. 农业工程学报, 1994, 10(4): 57~ 61
7. 西北农业大学水土工程研究所, 农业部水土工程重点开放实验室主编. 西北地区农业节水与水资源持续利用. 北京: 中国农业出版社, 1999 160~ 179
8. 黄正华. 颗粒状物料含水率传感器的研制. 传感器技术, 1993, 12(增刊): 19~ 21
9. 杜榕桓. 泥石流研究及治理. 北京: 科学出版社, 1983
10. 应火冬. 谷物介电性质及其含水量在测量中的应用. 农业工程学报, 1992, 8(3): 113~ 119

CAPACITANCE SENSOR MEASURING SEDIMENT CONCENTRATION IN WATER CURRENT

Li Xiaoyu^{1,2} Lei Tingwu^{1,3} Wang Wei²

(1 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100*)

(2 *Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling Shaanxi 712100*)

(3 *China Agricultural University, Beijing 100083*)

Summary

The relationship between sediment concentration in water current and output of capacitance sensor, and effects of temperature, flow velocity, soil types and its salinity content on the response of capacitance sensor have been studied for the first time by adopting two capacitance sensors different in structure. The results showed that the sediment concentration in water current is in linear correlation with the output of capacitance sensor, and the output of capacitance sensor increases with the temperature, but the effects of flow velocity, soil types and its salinity content on output of capacitance sensor were rather less.

Key words Capacitance sensor, Sediment concentration, Temperature, Flow velocity, Soil type, Soil salinity content