

蓄水减沙效益全过程监测设备与方法研究

赵方莹^{1,2} 巩潇¹ 李枫¹ 鲁明辉¹ 肖爱平³ 李璐¹ 万丽¹ 牛恩祥¹

(1.北京圣海林生态环境科技股份有限公司, 北京 100192; 2.中国林学会水土保持专业委员会, 北京 100083; 3.北京林业大学工学院, 北京 100083;)

摘要: 蓄水减沙效益是水文和水土保持监测的重要内容, 连续、准确并快速测量径流含沙量对于水土保持、土壤侵蚀的研究等具有重要意义。传统监测方式通过人工现场监测, 不能做到监测数据实时在线, 无法及时获取全过程动态数据监测, 从而制约了监测工作的精准和效率。目前的径流泥沙监测设备主要适用于径流小区、沟道应用场景, 只有个别设备适用于生产建设项目, 此外还存在安装复杂、运维难度大等问题。笔者团队选择峰值波长 940 nm 左右普通红外发光二极管作为红外光源, 研制了透射式红外泥沙传感器, 并对传感器输出信号和含沙量进行了标定试验, 建立光电信号与含沙量的回归模型, 利用回归模型验证传感器的测量范围和精度。研发了径流泥沙智慧监测系统, 可以在线对含沙量不超过 60 kg/m³ 的持续性径流, 或间歇性径流的含沙量、径流量和泥沙总量等数据进行全过程、动态统计分析, 并可以对相关指标设置警戒数值和预警信号, 对水土流失、泥沙危害进行预警。适用于生产建设项目、径流小区和沟(河)道等不同应用场景, 实现全过程、全流量、高精度径流泥沙监测。

关键词: 蓄水减沙; 水土流失; 径流泥沙; 全过程; 监测设备

我国水土流失严重, 2023 年度全国水土流失动态监测结果显示, 全国水土流失面积 262.76 万 km², 及时、精准地掌握国内水土流失动态是水土流失治理的基础工作和必要前提。径流泥沙含量是水文和水土保持监测的重要指标, 连续、准确并快速测量径流含沙量对于水土保持、土壤侵蚀的研究和水利工程运行安全等具有重要意义^[1,2]。

径流观测小区和沟道卡口站、河道断面径流含沙量的测量一般通过人工搅拌取样, 再进行烘干称重, 测量结果受采样随机性影响很大, 同时烘干时间长, 耗费人力物力, 劳动强度大、效率低、误差大。

根据国务院印发的《生态环境监测网络建设方案》及水利部制定的《全国水土保持信息化规划(2013—2020 年)》, 国家生态环境监测将“国家级水土保持监测点升级”列为重点建设项目, 拟开展监测点数据采集智能化升级, 配置自动化监测设备^[4]。2023 年中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于加强新时代水土保持工作的意见》中明确建立水土保持监测设备计量制度, 保证监测数据质量。推进现代信息技术与水土保持深度融合, 提高管理数字化、网络化、智能化水平, 促进科技成果转化和技术推广^[5]。

传统监测方式通过人工现场监测, 不能做到实时监测数据在线, 无法及时获取全过程动态数据监测; 尤其是径流小区采用径流桶人工取样检测, 视一场降雨产流和产沙值均一, 制约了产流产沙的动态研究。为此, 我们着手径流泥沙全过程动态监测的在线智慧监测系统研发, 以适用于生产建设项目排水口、径流观测小区和沟道卡口站、河道断面等多场景应用条件, 全过程、全流量、高精度的径流泥沙监测系统, 实现径流泥沙监测精准化、智慧化。

1 相关设备系统研发进展

研发适用的泥沙含量监测传感器至关重要, 是实现径流泥沙量全过程在线智慧监测的基础。传感器集成配套无线传输单元等功能, 将传感器获取相关数据无线传输至数据平台, 才能实现智慧化监测。

1.1 泥沙传感器

径流泥沙测量受限于泥沙组成复杂、监测环境多样、测量精度不高、数据采集效率低、市场空间小等因素,使得径流泥沙监测设备尤其是智能化设备供应稀缺。目前,含沙量的测量方法主要包括称重法、 γ 射线法、振动法、超声波法、电容法、光电法、激光法和遥感法等^{[1,2][6]}。其中常用的有称重法、光电法,近年来有相关团队对这两种方法做了深度优化研究。展小云等研发了基于定体积的体积-质量转换原理测量含沙量的仪器设备^[2],张勇等研发了基于比重法测量含沙量的监测设备^[4]。夏兵等人根据光的透射及散射原理,研发了具有自清洁、智慧监测功能的径流泥沙测定设备,并在深圳市生产建设项目中开始示范应用^[7]。

目前的径流泥沙监测设备主要都基于径流小区、沟道场景下的径流泥沙监测,不能适用于生产建设项目的应用场景,还存在安装复杂、运维难度大等问题。展小云、张勇研究的改良称重式主要适用于径流小区,在沟道需要配置动力泵进行提升作业再取样进行测量,测量操作复杂,并且需建设配套管理用房等设施;对于生产建设项目一般不具备称重式设备的安装高差等空间要求。夏兵等人研发的光电式监测设备只是测定了泥沙含量,指标单一;并且量程范围有限,对于高含沙水流不能测量监测,这些致使其推广使用受到限制。

有些研发设备脱离实践应用条件,没有实际应用推广价值。多款产品属于研发阶段产品,属于实验室理想状态下的测试产品,没有在野外实际复杂环境条件验证,尚未量产推广,产品性能不稳定、精准性差;由于市场化程度低,市场用量小,造成生产维护成本高,市场价格高,又制约进一步推广应用。多款产品不具备无线传输功能,缺乏实时监测能力,不能实时对径流泥沙全过程动态监测,无法实现远程智慧化监测^{[4][6]}。

1.2 配套设备与数据平台

利用泥沙传感器集成相关自动监测设备,将现场获取监测数据,传输至数据管理平台存储、处理,实现数据的集中分析,提高各类监测数据的共享和高效利用。

赵军提出了一种新型的含沙水流流量自动观测方法和测量系统。利用电子技术,机械制造技术设计、标定并验证了一种基于拉力传感的新型径流观测装置。开发的数据采集器和计算机管理软件可以方便的实现自动观测和远程控制,该装置适于径流小区的流量过程观测^[8]。刘琳等人研发了一种适用于径流小区流量过程的自动观测系统,系统集成量水堰、水位计和泥沙传感器,并配套了数据自动采集、存储和传输设备^[9]。2014 年长春工程学院和吉林省水土保持科学研究院联合申报了一种名为“径流泥沙含量实时测量装置及测量方法”(201410426952.X)的发明专利^[10]。

配套监测设备和数据平台的开发,涉及到水土保持、土壤泥沙、水文、水资源、水环境等多个专业,依托 IT、机械电子、通讯等专业的支撑,由于专业跨度大,监测设备集成、数据平台开发与相关行业、专业之间的交流融合度不够。加之市场空间小,缺少市场机制和缺乏市场活力;加之行业内各管理单位、技术服务单位对智慧化科技认知不同和对智慧化科技学习掌握的限制,这些造成专业硬件传感器研发的短板,缺少配套的在线传感器,仅少数产品具备数据的初级收集、贮存和无线传输的功能,并只适用于径流小区观测场景。

2 传感器与系统研发

随着 IT 等科技的飞速发展,需借助新科技手段,研发智慧化监测设备和集成系统,提高径流泥沙监测的智能化管理水平。泥沙传感器只能读取径流中泥沙含量,实现了泥沙含量数据的在线监测,并不能对径流泥沙总量等指标的全面监测,并且不同工作场景的安装使用条件不同,需要集成相关传感器构建泥沙自动监测系统才能实现更加强大的应用功能。

2.1 泥沙传感器测量原理

红外光透射法泥沙传感器的测量原理是当传感器发出的红外光照射含沙水流时,一部分被水流及泥沙颗粒散射和泥沙反射,还有一部分光线透射穿过含沙水流。在不同浓度的含沙水流中,能够投射的红外光线强度会有所不同。根据水体中泥沙含量对光透射衰减的影响规律,随着水流含沙量增加,泥沙对光线的阻碍增强,透过光线越少。在一定的入射光源强度下,通过标定传感器建立不同水流含沙量与透射光产生的电压信号强度的对应关系。根据雷霆武、李勇涛等人的前期研究^{[1][11]},我们研发团队选择峰值波长 940nm 左右普通红外发光二极管作为红外光源,研制了透射式红外泥沙传感器,并对传感器输出信号和泥沙含量进行了标定试验,再结合不同土壤类型、粒径差异的数据库,建立光电信号与泥沙含量的关系数学回归模型,利用回归模型验证了传感器的测量范围和精度,研发泥沙含量传感器。

2.2 系统功能目标与集成配置

系统的功能目标是实时、连续测量径流量、泥沙量,且体量小、安装便捷^[12,13]。

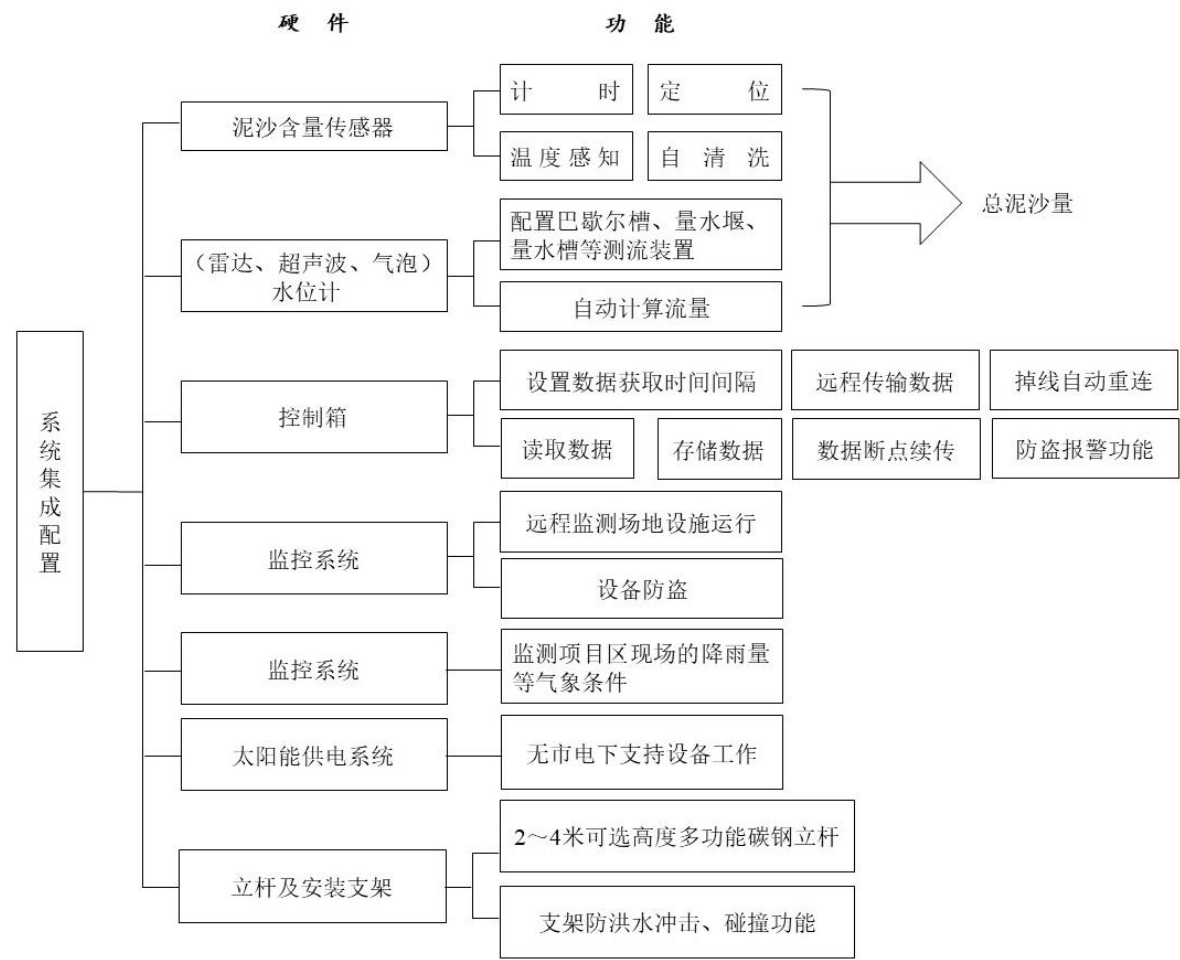


图 2-1 系统集成配置图

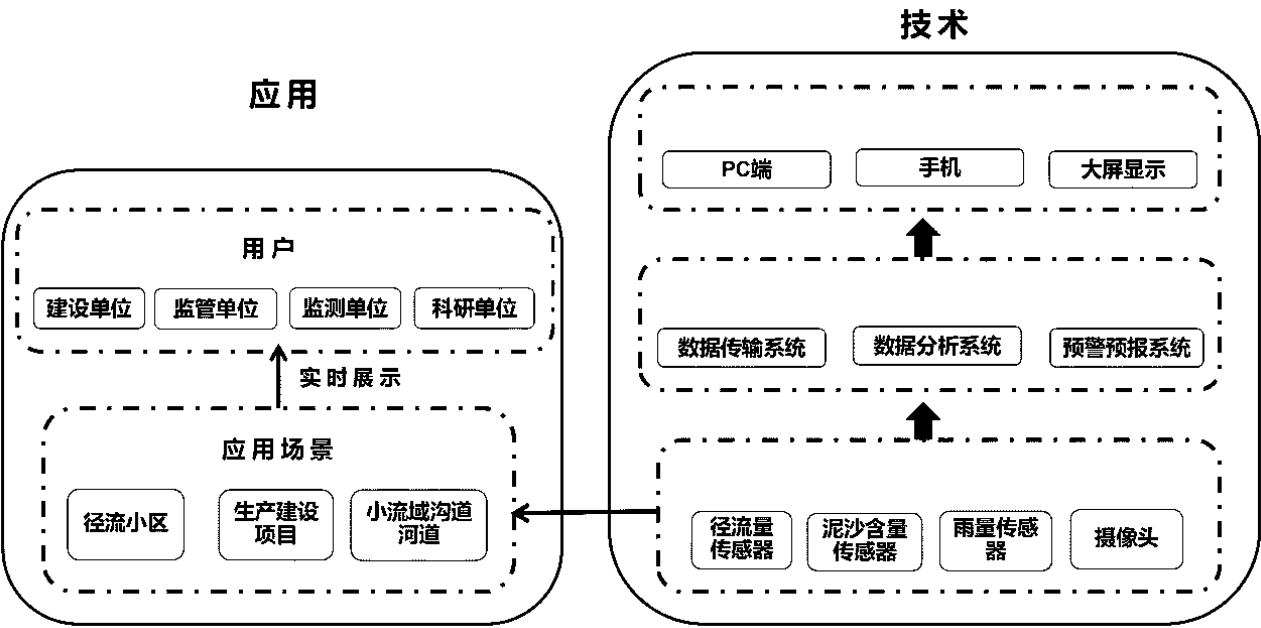


图 2-2 技术与应用图

2.3 测试与检验

（1）测试

实验室内采用高岭土均质土样，通过称重依次配置质量浓度为 5、15、25、50、75、95、120、140、165、185、205、230kg/m³ 设计含沙量的泥沙混合溶液，在水杯中进行静态试验，根据不同浓度泥沙含量与对应含沙水流传感器输出光电信号数据的关系，建立输出电压-泥沙含量关系模型。

实际含沙量为单位含沙水体中泥沙的质量，按下式换算：

$$C = \frac{C_d}{1 + C_d/\rho_s}$$

式中：C 为实际含沙量，kg/m³，C_d 为设计含沙量，kg/m³，ρ_s 为泥沙颗粒密度，取 2.65×10³kg/m³。

（2）检验

在室外采用 260 目过筛的均质壤土，用自制径流泥沙试验循环水槽，用称重法配置的特定泥沙含量的泥水试验，进行不同浓度的泥水进行检验测试。通过称重依次配置质量浓度为 5、10、20、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75kg/m³ 含沙量泥水，实验时待水槽水流运转稳定，悬浮泥沙均匀分布，读取泥沙传感器采集器数据，待数据稳定，读取数值。同一浓度含沙量读取 3 次数值，取平均值。实验中当含沙量大于 50kg/m³ 含沙量泥水在循环水槽有明显沉积。后采用自制可调坡度不锈钢滑槽进行检验，用称重法配置质量浓度为 5、10、15、20、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75kg/m³ 含沙量泥水，进行泥水试验，通过人工 3 次重复迅速倾倒，形成快速高含沙水流，在水槽下部设置水桶回收泥水。在水流通过期间读取

传感器显示器稳定的泥沙含量数值，对 3 次读取数值，取平均值。并对收集桶内后泥沙溶液人工取样、烘干称重，用于泥沙传感器的测量进行多重校准。

经自制径流泥沙试验循环水槽、自制可调坡度不锈钢滑槽进行试验，烘干称重法检验，泥沙浓度过大后，有泥沙沉积，当泥沙含量大于 70kg/m^3 ，不再遵循数学回归模型的规律。也验证了泥沙传感器只是测定的泥水中的悬移质，不包含推移质部分。通过多重手段检验回归模型，进行参数修正，最终确认回归模型。

根据不同土壤类型、不同粒径组成、不同比重，经大量数据实验，已经初步形成数据库，为不同场地土壤条件下设备参数标定提供支撑。



图 2-3 设备测试过程

2.4 数据平台

在云端设置数据平台，接收、贮存各传感器远程传输的数据信息。在平台服务器，经过初步数据处理分析，即时获取各项指标数据。

在泥沙测定系统现场控制箱显示屏选型测流堰槽类型，在数据平台根据自计水位计现场读数，按照测流堰槽类型，自动计算径流总量。再通过泥沙传感器泥沙含量即时读数与径流量的即时读数，应用本文 2.3 的公式和微积分法获得径流泥沙含量。

能够在线对不同时段的持续或间歇性径流的泥沙含量、径流量和泥沙总量等数据进行全过程、动态统计分析，并可以对相关指标设置警戒数值和预警信号，对水土流失、泥沙危害进行预警，提高径流泥沙监测的精准性和分析利用的高效性^[13]。

3 研发成果

3.1 系统技术特性



图 3-1 系统技术特性

3.2 设备系统技术参数

表 3-1 设备系统技术参数

指标	分项	技术参数
泥沙含量	测量范围	0.1~60kg/m ³
	采样间隔	1~6000s 内可调
	灵敏度	0.1kg/m ³
	测量精度	≥90%
液位	测量范围	0~1m/2m 可选
	采样间隔	实时
	灵敏度	1mm
	测量精度	≥95%
功率		8w
温度范围		存放: -40℃~80℃; 工作: 4℃ (不结冰) ~60℃
数据显示		全彩 7 寸触摸屏, 可显示、查询历史数据
数据采集		嵌入式 ARM 系统
数据传输		2G/3G/4G 远程无线传输
数据存储		本地与云在线存储, 本地可存储 180 天连续监测数据
供电方式		DC24V 光伏供电和 220V 市电互补双供电



图 3-2 产品实物

4 场景应用

径流泥沙全过程智慧监测系统可以适用于多种应用场景，包括生产建设项目、径流小区和沟（河）道不同场景，不同的应用场景需要有不同的配置安装方案。

为了能够通过透射光来有效测量径流泥沙，在安装时，保证传感器埕口顺着水流方向。对于小流量的过流断面，为了保证能及时精准测量，尽量将传感器头部接近堰槽的底部，但又不接触堰槽的底部。

（1）生产建设项目

生产建设项目保证监测项目区或分区对地表径流相对封闭，需要与沉砂池、巴歇尔槽或量水堰结合使用。在临时沉砂池下游、项目区地表径流主要输出口安装。对于点式生产建设项目可以整体监测或是分区监测，对于线性项目可根据监测分区、选择典型段进行监测。自项目开工起安装，项目竣工结束后拆除。强化生产建设项目施工全过程、全流量的泥沙径流监测监控。



图 4-1 北京顺义区林福科源农业园项目现场

（2）径流小区

对于径流观测小区使用，注意适用量程范围以及原集流槽推移质泥沙的处理方式。利用巴歇尔槽结合自计水位计进行流量监测，为了保证测流精准性，需要对巴歇尔槽进行封闭化处理。能够克服由于人工取

样随机性造成的误差,显著提高精准度。数据可接入监测网络,可实现数据的实时在线,获取产流全过程性、动态数据。



图 4-2 北京门头沟区龙凤岭水土保持科技示范园



图 4-3 河南南阳南水北调渠首水土保持科技示范园

(3) 小流域沟道、河道

在沟道、河道安装传感器设备时,对沟道、河道等容易有垃圾等漂浮物的监测场地,在上游设置截污拦污栅栏,对于有大型冲积物的设置防冲防撞设施。可以与水文监测结合使用,在水文水保的卡口站结合安装使用,完善水利监测指标。对于河道断面尺寸较大时,需要多点布置泥沙传感器。



图 4-4 河北易县崇陵水土保持科技示范园



图 4-5 重庆缙云山水土保持监测试验站

参考文献

- [1]雷廷武,张宜清,赵军等. 近红外反射高含沙量泥沙传感器研制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 51-57.
- [2]展小云,郭明航,赵军等. 径流泥沙实时自动监测仪的研制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 112-118.
- [3]汤召桃. 提高生产建设项目土壤流失监测精度的探讨[J]. 中国水土保持, 2020, (06): 59-61.
- [4]张勇,李仁华,姚赫等. 水土保持自动监测设备现状及新设备研发[J]. 人民长江, 2022, 53(09): 43-48.

- [5]中共中央办公厅, 国务院办公厅.关于加强新时代水土保持工作的意见[R].2022.
- [6]王讷敏,洪美玲,单帅,等.径流泥沙监测方法研究进展[J].亚热带水土保持,2023,35(02):21-24+30.
- [7]赵军,屈丽琴,赵晓芬,等.称重式坡面径流小区水流流量自动测量系统[J].农业工程学报,2007,(03):36-40.
- [8]刘琳,屈丽琴,雷廷武,等.径流小区产流过程量水堰自动测量系统[J].农业工程学报,2011,27(12):79-83.
- [9]李智广,曹文华,牛勇.坡面径流实时监测装置的测试与率定[J].中国水土保持科学,2017,15(03):58-64.
- [10]李勇涛,陈英智,李立新,等.基于 940nm 普通红外光源的反射式泥沙测量传感器研究[J].水土保持应用技术,2015,(06):10-12.
- [11]夏兵,张祯尧,蒋达,等.生产建设项目含沙量智慧监测设备研究与应用[J].中国水土保持,2024,(02):23-26.
- [12]赵方莹,巩潇,李璐等.一种泥沙量自动监测仪及在线监测系统[P].中国专利:202121328245.9,2021.06.15.
- [13]北京圣海林生态环境科技股份有限公司.2023SR1599457.水土流失泥沙量在线监测系统 V1.0[软件].2022.10.20.国家版权局