

远程智能测沙颗粒分系统的研发与应用研究

赵树坤 赵胜利 魏万勇

濮阳黄河河务局第一黄河河务局, 河南 濮阳 457199

[摘要]天然河流中的河水含沙量与泥沙颗粒级配随着流域来沙条件、水流情况及边界因素的变化而不断变化,这一变化对防汛、防洪、水土保持及河道整治等工作具有重要意义。准确了解河流泥沙运动规律及流域产沙过程是治理和管理的基础,尤其是在防洪关键期、应急抢险和河道整治中,准确的泥沙监测数据至关重要。随着计算机、通信和电子技术的发展,远程测控技术逐渐应用于水文监测领域,极大提高了数据的可靠性、准确性和实时性。结合嵌入式微型因特网技术和虚拟仪器技术,远程智能测沙颗粒分系统成为水文监测的新趋势。

[关键词]远程智能测沙;泥沙颗粒级配;水文监测

DOI: 10.33142/hst.v7i11.14291

中图分类号: P332.5

文献标识码: A

Research and Application of Remote Intelligent Sand Particle Separation System

ZHAO Shukun, ZHAO Shengli, WEI Wanyong

Yellow River Puyang Bureau, First Yellow River Bureau, Puyang, He'nan, 457199, China

Abstract: The sediment concentration and particle size distribution of river water in natural rivers constantly change with changes in sediment conditions, water flow, and boundary factors in the watershed. This change is of great significance for flood prevention, flood control, soil and water conservation, and river channel improvement. Accurately understanding the laws of sediment movement in rivers and the process of sediment production in watersheds is the foundation of governance and management, especially during critical periods of flood control, emergency response, and river regulation. Accurate sediment monitoring data is crucial. With the development of computer, communication, and electronic technology, remote measurement and control technology has gradually been applied in the field of hydrological monitoring, greatly improving the reliability, accuracy, and real-time performance of data. Combining embedded micro internet technology and virtual instrument technology, remote intelligent sand particle separation system has become a new trend in hydrological monitoring.

Keywords: remote intelligent sand measurement; particle size distribution of sediment; hydrological monitoring

引言

天然河流中的河水含沙量与泥沙颗粒级配随着流域来沙条件、水流情况及边界因素的变化而有所不同。在防汛、防洪、水土保持以及河道整治等工作中,准确理解河流泥沙的运动规律及流域的产沙过程是十分必要的。评估河道的未来发展趋势(如淤高、下切、稳定或游荡等变化)需要依赖这些数据。因此,河水含沙量及泥沙颗粒级配的精准测量在这些工作中扮演着至关重要的角色,尤其是在防洪关键期、应急抢险和河道整治等环节中,数据的精度与效率直接决定了水文观测、预报以及河道治理等工作的成效。伴随着计算机、通信与电子技术的迅速发展,远程测控技术逐步应用于各行各业。通过数据专线、光纤通道、Internet 以及无线通信等技术手段,远程测控系统的应用能够确保数据的可靠性、准确性与实时性。这些技术的应用已获得显著的社会经济效益,且远程测控技术正朝着数据传输方式多样化的方向发展。结合 EMIT(嵌入式微型因特网互联技术)与 ECS(嵌入系统)技术,以及基于虚拟仪器的测控网络,已逐渐成为主流趋势。在此背景下,本研究基于黄河防汛、应急抢险及水资源开发利用的实际

需求,开展了“远程智能测沙颗粒分系统”的研发与应用。该项目已取得了令人满意的成果。

1 国内外研究现状

目前,测沙颗粒分方法种类繁多,涵盖了烘干称重法、比重瓶称重法、红外光电测沙法、同位素测沙法、超声波测沙法、激光浑浊度测沙法、激光测沙颗粒分法、遥感测沙法、电导率测沙法以及比热测沙法等。较为经典的烘干称重法与比重瓶称重法,因其较高的精度,被广泛采用。然而,测量周期较长,且受到操作人员技术与样品处理的显著影响,导致数据的时效性差,且无法实现实时在线监测。红外光电测沙法以浑水消光定律为基础,但因水体中泥沙粒径与浓度分布的非均匀性,测量结果可能会产生误差。在高含沙量下,由于透射光强度难以辨识,该方法的应用受到了限制。通过同位素法,可以直接测量河流中的含沙量,然而,由于其涉及辐射安全问题,部分发达国家已将此方法禁用。超声波测沙法具有较好的穿透性与宽频带,在低含沙量下,测量精度较高,但受泥沙相互作用与超声波散射效应影响,在高含沙量下表现较差。激光测沙颗粒分法能够快速完成测量,且具备较大的量程,但设备昂贵、

操作复杂，主要应用于港工、水工及河工的实验研究中。遥感测沙法通过悬沙散射光波测量含沙量，然而，水体的反射率与气象条件等因素的变化，使得测量误差较大。电导率测沙法以其简单的系统构造、低成本、响应速度快等优点应用广泛，但受温度与土壤含盐量的影响较大，且目前仍处于理论研究阶段。比热测沙法适用于高浓度含沙量的测量，但技术尚未成熟，仍需要进一步完善。

2 成果介绍

2.1 主要指导思想、依据和原则

以习近平新时代中国特色社会主义思想及“让黄河成为造福人民的幸福河”的重要指示为指导，以服务黄河治理开发事业高质量持续发展为宗旨，以理念引领、问题导向、守正创新、持续改进、三效并举为原则，紧紧立足黄河防汛和水资源管理与开发事业发展需要，从破解当前黄河测沙关键技术难题入手，探索高效测沙新仪器、新技术。

本项目实施过程中，始终坚持以水文学、光学、信息科学等科学原理为指导，提高研究活动的前瞻性、科学性、高效性。所涉及科学原理主要有浊度测沙原理、浑水消光原理、静水沉降原理和光电效应原理。①浊度测沙原理：根据光学原理，光线在水体中传输，由于水中介质的作用会发生吸收和散射现象，根据散射信号接收角度的不同可分为透射、前向散射（散射角度小于90°）、90°散射和后向散射（散射角度大于90°）。从理论上讲，监测任一角度的红外光线散射量均可测量浊度。测沙实践中，主要是监测散射角为140°~160°之间的红外光散射信号，这个区间的红外光光散射信号稳定。之所以选择后向散射红外光线，是基于以下原因：（1）红外辐射在水中衰减率较高，自然太阳光的红外光部分，在传输中完全被水体所衰减，这样测量光源发射光束不会受到外界自然光的干扰。（2）后向散射范围内红外光散射率比较稳定。（3）在红外光后向散射接收范围内，无机物质的散射强度明显大于气泡和其余有机物质。

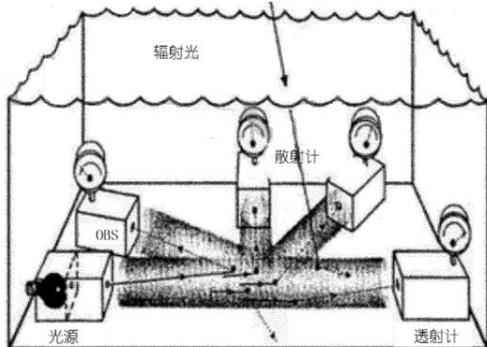


图1 光学散射示意图

根据瑞利散射定律，当散射微粒的线度小于波长时，散射光的频率与入射光相同，而其强度与频率 f^4 成正比。若入射光为自然光，不同方向散射光的强度正比于

$1 + \cos^2 \theta$ ， θ 为散射光与入射光间的夹角，称散射角。 $\theta = 0$ 或 π 时散射光仍为自然光； $\theta = \pi/2$ 时散射光为线偏振光；在其他方向上则为部分偏振光。

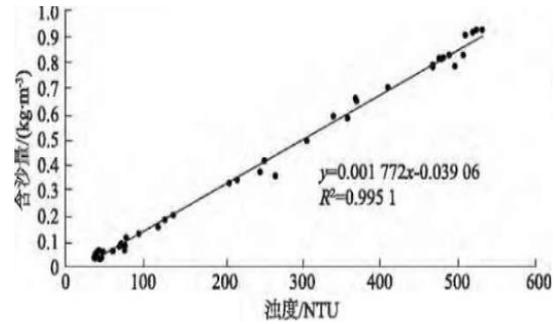


图2 含沙量与浊度相关性举例

②浑水消光原理：一束平行光通过均匀分布的含沙水体后，透射光的强度就会减弱，一部分光被水体中的悬沙吸收，另一部分光被散射到其他方向，透射光只是入射光的一部分，由比尔定律可得：

$$\Phi = \Phi_0 e^{-KSL/d} \quad (1)$$

式中： Φ_0 ——入射光通量； K ——吸收系数；

Φ ——透射光通量； S ——含沙量；

L ——光穿透浑水层的厚度； d ——泥沙粒径。

现实生产中的浑水体系，所有颗粒都是大小不等的具有接近物理性质的各向同性小圆球，颗粒的大小差别不大。大量颗粒随机取向的统计平均效应与球形颗粒是一样的；水样中所含颗粒浓度不大。个别颗粒对光的散射效应是独立而各不相关。并且对光强的削弱主要是单次散射效应的作用。水样中各粒子的削光截面符合叠加原理。

③静水沉降原理：静水沉降原理是不同粒径的土粒在静水中的沉降速度不同。土粒在静水中沉降时，受到土粒的重力和液体水的阻力两种力的作用，斯托克斯(Stokes)

根据这两种力的平衡条件建立了土粒直径与沉降速度的关系，即：

$$V = \frac{2(\rho_T - \rho_0)gd^2}{9\mu} \quad (2)$$

式中： V ——土粒在静水中的沉降速度(cm/s)； d ——土粒直径(mm)；

g ——重力加速度 (cm/s^2)； ρ_T ——土粒密度 (g/cm^3)；

ρ_0 ——水的密度 (g/cm^3)； μ ——水的动力粘滞系数

($10^{-6} \text{KPa} \cdot \text{s}$)。

由于水的密度(ρ_0)与水的动力粘滞系数(μ)只随液体的温度而变化，所以对于某一种土的悬液来说，当悬液温度不变时，上式中 g 、 ρ_T 、 ρ_0 和 μ 均为定值。由此可得，当温度不变时，土粒沉降速度(V)与其直径(d)的平方成正比，即大颗粒比小颗粒下沉快得多。

依据以上原理，便可通过在90分钟时段内的16个时刻（分别是第0秒、第5秒、15秒、30秒、60秒、120秒、180秒、300秒、600秒、900秒、1200秒、1800秒、

2700 秒、3600 秒、4500 秒和 5400 秒) 采样值, 通过单片机内置计算程序得出河水泥沙颗粒的级配数据。④光电效应: 光电效应指在高于某特定频率的电磁波(该频率称为极限频率)照射下, 某些物质内部的电子吸收能量后逸出而形成电流(光生电)。能够利用光电效应, 将光信号转换成电信号的器件, 称为光电转换器件。自光电效应发现以来, 光电转换器件取得了突飞猛进的发展, 并被广泛地应用在各行各业。其中, 常用光电效应转换器件有光敏电阻、光电倍增器、光电池、PIN 管、CCD 等。

④本系统测沙颗粒也是采用光电转换器件, 用相对测量的方法, 将透射红外光强度信号经过一系列转换, 使通过清水的光通量转换为电信号 V_0 , 通过含沙水体的光通量转换为电信号 V_i , 再经转换后得出含沙量与电信号关系式:

$$V_i = V_0 e^{-Kc/d} \quad (3)$$

其中: V_i ——通过含沙水体的电信号; K ——系数;
 V_0 ——通过清水的电信号; C ——含沙量 (Kg/m^3);
 d ——泥沙粒径 (mm); 在泥沙有级配情况下, 取级配曲线上 50d 数值。

此后, 在稳压电源、放大电路的作用下, 便可将河水含沙量转化电信号, 从而达到测量河水含沙量和颗粒级配的目的。

2.2 主要研究内容的分析、计算与组织实施

2.2.1 研究内容

本成果的主要内容主要有:

2.2.1.1 系统组成

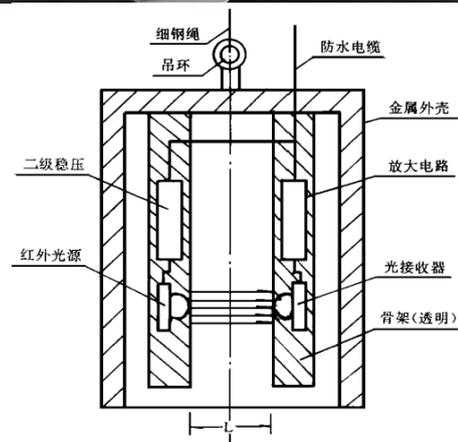
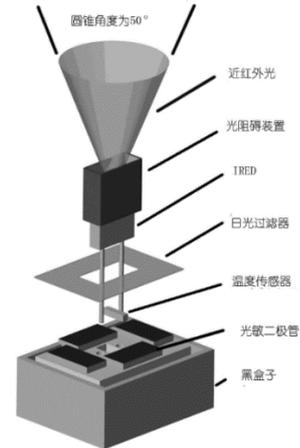
一型智能测沙颗粒分系统由测沙颗粒分终端、数据传输网络、工业通信网关、数据存储中心、远程控制中心、应用系统等部分组成。



图3 智能测沙颗粒分系统示意图

2.2.1.1.1 测沙颗粒分终端

测沙颗粒分终端内置测沙颗粒分传感器、微处理器、存储器, 具有自动存储、记忆和受控传输功能, 并通过 RJ-45 接口或 NB-IoT (窄带物联网) 方式连接数据传输网络, 可以利用浑水消光原理, 定时或实时感知并输出河水含沙量及其泥沙颗粒级配。



(左上: 终端配测沙左下: 终端配颗粒分右上: 测沙传感器右下: 颗粒分传感器)

图4 测沙颗粒分终端及传感器结构示意图

测沙传感器通过将浑水的浊度浓度转换为电压信号进行测量。其外壳采用不锈钢密封封装, 内含红外光源、

红外光接收器、稳压电源及放大电路。浸入水中后，传感器可测得水的浊度，从而转换为含沙量。

颗分传感器将河水中的泥沙浓度转化为电压信号。其外壳为不锈钢管，带有小孔，内部设有骨架，骨架内安装红外光源、红外光接收器等。泥沙颗粒对红外光源发出的光有吸收与散射作用，依据浑水消光原理，红外光接收器接收到的光强与河水含沙量呈负相关，进而计算颗粒级配。

若无法接入宽带网络，可通过 NB-IoT 无线方式或部署在 GSM、UMTS 或 LTE 网络上实现连接，降低部署成本并实现平滑升级。终端提供电池、直流、交流与 POE 四种供电方式，可根据需求选择。

测沙颗分终端具备自检与报警功能，出现异常时会自动向控制中心报警。内置高性能稳压电源与高精度信号放大电路，并采用光电耦合隔离技术，以防电场、磁场干扰。同时，内置时钟日历电路，具有记忆功能。

2.2.1.1.2 数据传输网络

数据传输网络是将测沙颗分终端输出数据传输到物联网网关的数据传输链路。可以根据工作环境及工作需要，自主选择互联网、局域网、物联网、5G/4G 移动通信网、OTN/MSTP/IPRAN 数据专网等，以确保数据安全传输。

2.2.1.1.3 工业通信网关

通信网关作为系统的基础硬件设施，部署于数据访问客户端、测沙颗分数据传输网络和数据中心存储之间，实现对测沙颗分数据的采集、传输和处理，并在通讯协议的适配下，与远程控制中心进行反馈，保证测沙颗分数据的实时更新。同时，通过识别访问者身份、位置、行为，同时依靠对被访问对象的全面认知，实现数据内容的访问控制、访问审计、动态脱敏等，确保数据安全。

2.2.1.1.4 数据存储中心

数据存储中心采用网络附属存储 (NetworkAttachedStorage) 技术，通过存储设备与服务器彻底分离，实现数据集中管理，确保数据安全和使用的效率。

2.2.1.1.5 远程控制中心

远程控制中心安装 GWYC-一型远程智能测沙颗分控制系统，可以远程实时监视、控制全部或指定测沙颗分终端的工作状态，并在云平台实现可视化处理。管理者可以随时随地查看河水含沙量及泥沙颗粒级配数据，适时采取合适的措施进行管理。

2.2.1.1.6 应用系统

一型智能测沙颗分系统数据可以并网到上一级大型系统，或通过授权访问的方式，为相应的用户提供数据服务，将河水含沙量及泥沙颗粒级配应用于水文观测预报、水利工程运行维护、河道治理与研究、水生态文明建设等领域，服务社会经济发展，实现数据的价值。

2.2.1.2 控制与分析软件

控制与分析软件是一型远程智能测沙颗分系统的神经中枢，在整个系统的运作中起着指挥、调控、分析、保障等核心功能。

2.2.1.2.1 操作界面

控制与分析软件界面秉承“界面直观易理解、操作简便易掌握、业务流程人性化、人机友好效率高”原则，力求建立起高效人机接口。为此，界面设计时，我们尽量借鉴被社会广泛认可的通用界面，并结合黄河日常工作流程，通过业务处理自动化、数据分析可视化、数图结合直观化、效果展示同步化等技术，实现了人机界面的优化。

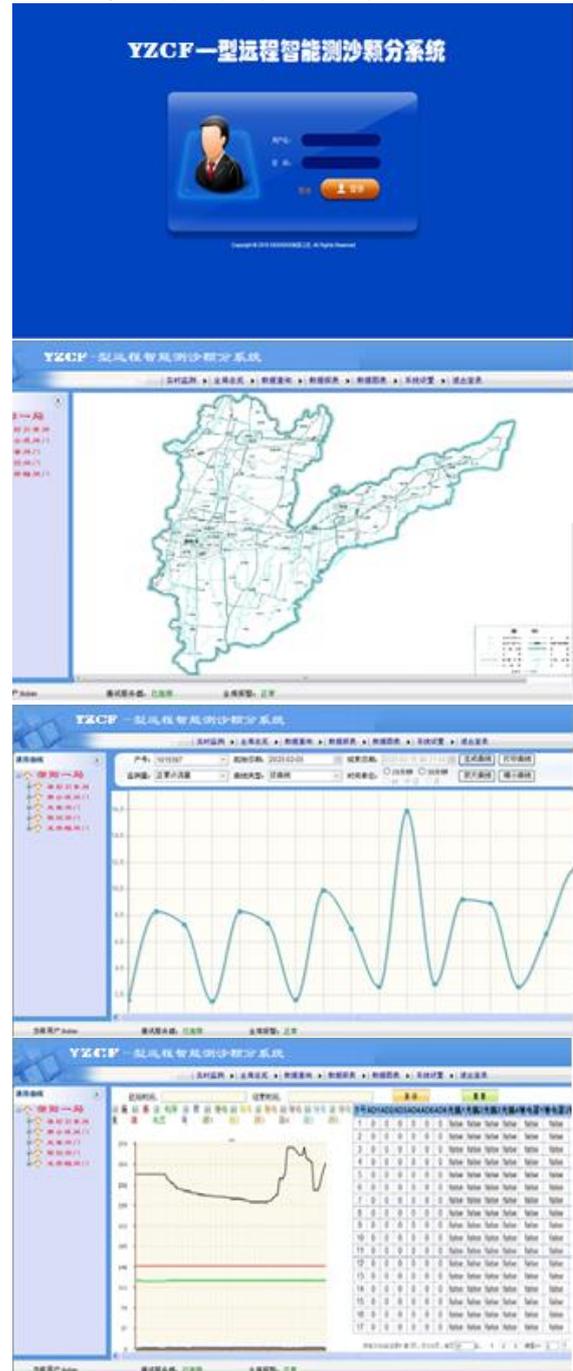


图5 控制与分析软件的操作界面举例

2.2.1.2.2 软件功能

控制与分析软件功能立足系统运行、黄河业务实际需要而设计，主要包括用户管理、系统运维、数据分析等。

2.2.1.2.2.1 用户管理功能

用户管理功能主要包括：新增用户、编辑用户、删除用户、修改密码、设置角色、授权管理、组织调动、用户有效性、用户列表等。



图6 用户管理界面

2.2.1.2.2.2 系统运维功能

系统运维功能致力于保障系统正常运行，主要包括设备管理、组网管理、流程管理、事件管理、问题管理、变更管理、发布管理、运行管理、知识管理、综合分析管理等。其中，设备管理又包括设备布设、设备调试、状态检测、远程开机、远程控制、远程监控、远程文件传输等。

2.2.1.2.2.3 数据管理功能

数据管理功能包括：数据查询、数据召测、异常数据、数据分析、数据导入/导出、数据备份、数据上报等管理。数据查询又包括实时数据查询、历史数据查询、自定义数据查询等。

3 创新点

本成果的创新体现在多个方面。引入的远程测控与物联网技术，成功实现了从传统的分散式人工测沙颗粒分方式到联网统管与远程测控模式的转变。这一转变极大地提升了工作效率，且在克服了人力、财力、物力及技术等方面的瓶颈后，实时、连续与同步测控等功能得以实现，推动了黄河测沙颗粒分工作进入新的阶段。通过优化组网模式及协议，本成果实现了互联网、局域网、物联网、5G/4G 移动通信网、OTN/MSTP/IPRAN 数据专网等多种组网方式的集成，从而显著提升了系统的适应性、安全性与覆盖范围，为系统的广泛应用提供了坚实的技术保障。在新型测控终端的研制中，既保证了测量精度，又有效降低了生产、布设与运维成本，显著提高了经费的使用效益。通过信息化

与物联网技术的融合，本成果在创新管理模式与优化业务流程的同时，还拓展了数据分析与应用的领域，进一步承担了新领域的社会责任，为推动黄河治理及区域社会发展贡献了重要力量。

4 推广应用及效益

自2022年以来，本成果已在多个地区得到推广应用。濮阳第一河务局的5座涵闸及濮阳县水利灌区共布设了32个远程测控点，实现了黄河流域的全面覆盖；范县河务局的3座涵闸及范县水利灌区布设了21个远程测控点；在台前河务局的2座涵闸及台前县水利灌区，13个测控点已成功设置。这些应用显著提高了测沙颗粒分的精度与工作效率，获得了广泛的认可和好评。

在社会效益方面，自动化测沙颗粒分的实现，成功替代了传统人工分散测报方式，极大地提升了工作效率。传统的人工测报往往受天气等因素的影响，周期长且数据误差较大，而通过本成果，测量工作仅需数分钟即可完成，不再受外界条件限制，精度得到了显著提高。特别是当需要连续测量时，人工方式根本无法满足要求，而本成果能够轻松实现这一需求。此外，数据实时采集与更新，极大提升了数据处理效率与精确度，远远超出了传统方法的局限性。

在改善工作条件方面，应用本成果后，显著减轻了从业人员的劳动强度，改善了工作环境。传统测沙颗粒分工作常需在恶劣的天气条件下进行，且高强度的体力劳动会对从业人员的身心健康产生负面影响。而使用本成果后，工作流程变得更加简便，操作人员只需在控制中心轻松操作几次便可完成任务，从而有效减少了劳动强度。

从经济效益来看，采用本成果后，运营成本显著降低。系统仅需支付少量电费、通信费、设备维护费及部分操作人员工资，相较传统方法，大大节省了人力、物力、差旅等各项支出。据实际数据统计，每年节省的经费超过160万元，体现了较为显著的经济效益。

环境效益方面，随着本成果的应用，黄河防汛及治理工作的质量得到显著提升，黄河发生险情的风险大大降低，抢险与次生灾害的相关成本也随之减少。由此，环境损害得到了有效抑制，带来了无法估量的环境效益。

[参考文献]

- [1] 蔡守允. 新型光电式智能测沙颗粒分仪[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(8): 79-80.
 - [2] 刘玉英, 刘增厚. 智能化超声测沙仪的研制及应用[J]. 泥沙研究, 1994(2): 7.
 - [3] 李文瀚. 基于云平台的径流泥沙含量远程监测系统研究与实现[J]. 工程科技, 2020(2): 50.
- 作者简介：赵树坤（1978.8—），男，毕业于中央广播电视大学，本科学历，所有专业：水利水电工程，现就职单位：濮阳黄河河务局第一黄河河务局，职务：副局长，所在职务的年限11年，目前职称：高级工程师。