

# 激光粒度分析仪在泥沙粒径分析中的比测应用

吴 琮<sup>1,2</sup>, 宋星原<sup>1</sup>, 张立军<sup>2</sup>, 万恒武<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 长江水利委员会 长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉 430012; 3. 长江水利委员会 水文局, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**马尔文激光粒度分析仪是目前世界上较先进的室内粒度测试仪器之一。通过对城陵矶、螺山、汉口、仙桃等水文站大量比测资料的分析,研究了马尔文激光粒度分析仪(MS2000)的适用条件以及参数适用范围,提出了 MS2000 与传统粒径计-吸管法分析成果之间的转换关系,为 2010 年 MS2000 在长江流域的推广应用提供了依据。

**关键词:**激光粒度分析仪; 粒径计-吸管法; 泥沙颗粒分析; 长江流域

**中图分类号:** TV143 **文献标志码:** A

## 1 研究背景

悬移质泥沙颗粒级配是研究河床冲淤和河道输沙能力等方面的基础资料。而传统的悬移质泥沙颗粒级配分析在取回水样静置后,要用两个筛子过滤、除杂并分出粗沙、细沙,并分别进行粒径计分析和吸管法(或离心沉降)分析。其后进行烘干、称重处理。水样处理完毕,还要计算出沙重并输入电脑,进行点配、垂配、断配计算。有时为了分析需要,外业还要加倍取样,工作量很大,且耗时长。

马尔文激光粒度分析仪(MS2000)是目前世界上比较先进的室内粒度测试仪器之一,其测试的粒度范围广、速度快、效率高。该仪器的粒径测试范围为 $0.02 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ ,涵盖了悬移质泥沙颗粒分析的粒径计、吸管法等传统手工分析方法以及粒度范围较窄的其他仪器分析粒径范围,可以使悬沙的颗粒分析用一种方法分析完成,而无需分段使用结合法分析。近年来,国内逐步引进了一批 MS2000,提高了泥沙颗分工作的效率,有力推进了水文测验方式方法的创新。但如何实现与传统分析成果之间的衔接,以符合《河流泥沙颗粒分析规程》要求,还需要大量的比测分析。

本文主要对城陵矶、螺山、汉口、仙桃等水文站大量比测资料进行分析,研究了 MS2000 在不同河段、不

同水沙条件下的泥沙颗粒分析适应条件和参数适用范围,以及激光法与传统法颗粒级配成果之间的转换关系,为激光粒度仪的投产提供依据和基本资料。

## 2 MS2000 简介

### 2.1 仪器结构及原理

MS2000 系统的组成主要包括 3 个部分:主机(光学元件)、附件(进样器)、计算机和 Malvern 测量软件。

激光粒度仪的工作原理是基于夫朗合费衍射和 Mie(米氏)理论的结合。物理光学推论:颗粒对于入射的散射服从经典的米氏理论。

### 2.2 主要性能指标

仪器检测速度为 1 000 次/s。采用激光衍射方法,完全符合 1997 年颁布的 ISO13320 激光衍射方法粒度分析国际标准。同时,MS2000 具有 SOP(Standard Operation Program)功能,可在软件的指引下完成设置和自动操作,消除人为操作和外部环境影响产生的误差。其分析成果可提供粒度分布数据、图形、平均值、中数粒径、峰值等信息。

## 3 传统法

以往,水文部门通常采用的悬沙颗粒分析传统方

法有两种:一种是粒径计与吸管法相结合法(以下简称“粒—吸结合法”),另一种是粒径计与 BT-1500 离心沉降仪相结合法(以下简称“粒—仪结合法”),这两种方法分析得到的颗粒粒径均为沉降粒径,分析成果符合《河流泥沙颗粒分析规程》要求。

## 4 激光粒度仪试验

激光粒度仪试验是指对激光粒度仪本身的参数、性能的测试。

### 4.1 基础参数试验

取一定数量含有粗、中、细不同颗粒级的悬沙样品,采用不同参数(分散时间、搅拌速度、泵速、超声强度、遮光率、测量快照次数、颗粒吸收率、分散剂折射率等)进行试验,找出这些参数的适用范围,作为不同沙型条件下的技术参数,用于与传统方法转换的比测分析。

### 4.2 分散试验

在传统的分析方法中,为了使絮凝的颗粒分散,分析前在样品中要加入反凝剂进行分散处理。激光粒度仪提供了超声波分散功能。随机取了 10 个样品,用激光粒度仪对样品加入反凝剂和不加反凝剂进行了对比分析,结果误差较小,最大误差仅为 2.8%,可使用超声波分散替代反凝剂进行分散处理。

### 4.3 稳定性(重复性)试验

为了检验激光粒度仪分析成果的稳定性,选取粗、中、细沙共 3 个样品,每个样品重复测定 30 次,取 30 次的平均值与单次结果进行比较,并分别计算级配系统误差和标准差。

通过对激光粒度仪的稳定性性能测试,一个样品重复多次分析的重复性较好,仪器的稳定性较高。

### 4.4 平行性(重现性)试验

平行性试验包括准确性试验和重现性试验。准确性试验是指用激光粒度仪与传统分析方法的对比分析试验。重现性试验是将 1 个泥沙样品等分成 30 份,用激光粒度仪对每份沙样逐一测量,并与 30 份沙样的平均值进行对比。

(1) 同一样品分次分析(重现性)。将一个样品等份成 30 份,逐个用激光粒度仪进行分析。从分析结果看,同一样品等分 30 个样分次测试的最大平行性误差为 2.7%,满足规程小于 5% 的要求。测试级配分布带状较窄,激光粒度仪多次测量结果的平行性(重现性)具有较高的精度。

(2) 准确性测试(标准样品检验)。准确性也是仪器性能的一个重要指标。由于传统法与激光法是两

个不同的测试原理与体系,它们之间无法比较准确程度,因此,采用国际上通用的做法,用标准粒子检验激光粒度仪的准确性。用生产厂家提供的标准粒子检验激光粒度仪的准确性,测试结果与标准粒子的结果非常接近。

## 5 与传统法分析的比测试验

激光粒度仪是以体积为基准、用等效球体来表现测量结果的;传统法是以重量为基准、使用沉降原理来测量泥沙颗粒(需假定颗粒是球体且比重相同)。传统法是以单位液体体积中烘干物的总质量为基准的,它不考虑这些物质是否有比重判别,开头差别和某些物质烘干前后的体积差别等因素;而激光粒度仪是以当时水样测出的颗粒体积为基准,经过换算才与传统法比较。

比测所选测站(汉口、安乡、南咀、城陵矶、仙桃站)能代表各测区的水沙颗粒变化特性,位于水域重要控制位置,是水文重要控制站。汉口站、安乡站、南咀站、城陵矶站采用粒—仪结合法,仙桃站采用粒—吸结合法,为本次与激光粒度仪比测的传统方法。

### 5.1 标准样本库

#### 5.1.1 建立标准样本库

对激光法与传统法的比测数据作相关分析,激光法与传统法泥沙颗粒分析级配同粒径组对应累积百分数的关系数  $R^2 \geq 0.9$  的测试数据作为有效分析数据,建立标准级配样本库。标准级配样本是同一泥沙样品,分别采用激光法与传统法,按规程规定分析所得出的一组对应级配数据,即单次激光粒度仪悬沙颗粒级配(粒径—小于某粒径累积体积百分数),传统法(粒径—小于某粒径累积沙重百分数)颗粒级配。通过对相关系数的筛选,建立了 50 组分析下限 0.004 m、38 组分析下限 0.002 m 的标准级配样本库。

#### 5.1.2 数据转换

长江水文积累了大量的传统法分析资料。为了使传统法与激光法有效衔接,从而达到颗分资料的连续性、一致性,就要解决转换问题,为此,长江水文技术研究所研发了“激光粒度仪泥沙颗粒级配转换软件”。运用此软件建立了标准样本库后,对本次用激光粒度仪测试的级配结果进行了转换,系统偏差情况。小于某粒径沙重百分数的系统偏差的绝对值在级配的 90% 以上部分最大一组为 2.3(0.250 mm),90% 以下部分小于 3,随机不确定度小于 7。

#### 5.1.3 样本库的检验方法

检验方法如下:

$$\Delta P_i = P_i - P'_i \quad (1)$$

$$|\overline{\Delta P_i}| = \left| \frac{\sum_i^n \Delta P_i}{n} \right| \quad (2)$$

$$\sigma = \left[ \frac{\sum \Delta P^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$X' = 2\sigma \quad (4)$$

式中,  $P_i$  为激光法转换的传统级配为累计小于某一粒径沙重百分数, %;  $P'_i$  为传统粒吸结合法分析的累计小于某一粒径沙重百分数, %;  $\Delta P_i$  为转换与传统粒吸结合法分析的某一粒径沙重级配百分数差值;  $|\overline{\Delta P_i}|$  为转换与传统粒吸结合法分析的某一粒径沙重级配百分数的系统偏差绝对值;  $\sigma$  为标准差;  $X'$  为随机不确定度(置信水平为 95%);  $i$  为某一粒径级;  $n$  为某一粒径系列样本总数。

如转换成果得出的精度指标  $|\overline{\Delta P_i}|$  满足《河流泥沙颗粒分析规程》规定, 则检验合格; 否则, 进行合理性检查分析原因。如果测试结果合理正常, 将该次分析成果扩充为标准样本。

## 5.2 两种方法平行性比较

激光法与传统法之间的平行性测试所测出的颗粒粒径结果之间, 存在大小不同的差异, 产生差异的原因如下:

(1) 两种分析方法的原理不同。传统法是依据沉降原理, 激光法是依据光的散射原理, 不同分析方法之间存在系统性偏差。

(2) 两种分析方法在测量过程中都不是直接测量颗粒的大小, 而是根据颗粒大小不同划分若干的粒径级, 以每个粒径级的颗粒占总量的多少来计算相应的百分数。天然河流的泥沙样品是一个复杂的组合物, 颗粒的形状复杂多样, 对同一颗粒使用不同的测试方

法, 有可能被划分在不同的粒径级。

(3) 两种划分方法测试的结果表示方法不同。传统法是以重量表示, 即粒径—小于某粒径沙重百分数; 激光法则是以体积表示, 即粒径—小于某粒径体积百分数。由于河流泥沙样品中每个颗粒的比重不完全相同, 因此, 即使通过两种方法之间的换算也可能不完全一致。

## 5.3 两种方法数据转换

对比测数据进行相关关系分析, 将相关系数  $R^2 < 0.9$  的测试结果剔除, 用满足相关系数的测试数据建立标准样本库。

通过标准样本库, 用长江委水文局开发的转换软件, 将测试的激光粒度仪数据进行了转换。从转换后的误差结果看, 数据转换结果能够满足《河流泥沙颗粒分析规程》的要求。

## 6 结论

(1) 通过对 5 个测站 88 点的样品分析认为: 汉口站能够代表长江中游河段的水沙颗粒变化特性, 仙桃站能够代表汉江下游的水沙颗粒变化情况, 城陵矶站、南咀站和安乡站能够代表洞庭湖区的水沙颗粒变化特性, 这 5 个站的代表性较好, 样品分析满足要求, 2010 年激光粒度仪已投产使用。

(2) 通过对激光粒度仪的性能测试, 一个样品重复多次分析的重复性较好, 仪器的稳定性较高; 激光法自身的平行性较好。

(3) 确定了激光粒度仪分析的基础参数。

(4) 可以用超声波分散替代反凝剂分散。

(5) 比测成果经转换软件转换后, 能够满足《河流泥沙颗粒分析规程》的要求。

(编辑: 李慧)

(上接第 146 页)

## 6 结论与建议

(1) 在现状条件下, 沮漳河防洪能力仅能达到 5 a 一遇洪水标准, 不能达到原规划的 10 a 一遇标准。因此, 应加紧实施沮漳河防洪工程综合治理, 以确保沿河地区的防洪安全。

(2) 必须加强河道的管理, 尽快实施沮漳河平坑

行洪工程。

(3) 1996 年汛后, 对沮漳河进行了一系列的整治加固工程, 同时由于三峡工程建成, 荆江河段的防洪形势已发生较大改变, 现行沮漳河洪水调度方案不适应当前的水情、工情, 建议对洪水调度方案进行修改完善。

(编辑: 常汉生)