

# 一种突发山洪非接触式实时流量监测技术

李世勤<sup>1</sup>, 骆曼娜<sup>2</sup>, 王江燕<sup>3</sup>, 王吉星<sup>3</sup>

(1. 江西省水文局, 江西 南昌 330002;  
2. 江西省鄱阳湖水文局, 江西 九江 322000; 3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012)

**摘要:** 对比传统流量监测, 本文提出一种非接触测流方式, 介绍了非接触雷达流量传感器主要特点, 详述了基于非接触式测流原理的雷达流量传感器及其监测系统的实现方法. 设计出基于非接触流量传感器的流量在线监测传输系统, 就其实际应用进行分析, 以期后续得以推广应用.

**关键词:** 山洪; 非接触测流; RQ30 测流装置

**中图分类号:** P338

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1004-4701(2015)02-0132-05

## 0 引言

山洪灾害发生突发洪水期间, 水文测验条件非常恶劣, 主要表现是在高速漂浮物、泥沙等影响下, 常用的缆道测流、走航式 ADCP 测流、船测和桥测施测均不能进行; 突发山洪的最高流速很可能超出缆道测流或走航式 ADCP 测量的最大流速范围. 在现有测流的技术不能满足山洪灾害引发高流速环境测量需求的情况下, 采用非接触式的流量测验方式是另一种技术手段.

在国外, 法国国家水文气象与洪水预报中心 (SCHAPI) 为应付如影响赛文 (Cévennes) 山脉地区严重的雷暴和突发性洪水的威胁设立了野外流量监测站, 采用非接触式的流量测验技术, 提供山洪暴发期间的连续监测信息; 该技术能进行每日 24 小时不间断流速、水位、流量的监测, 为易于产生突发性洪水地区的洪水预报提供支持帮助, 使监测管理部门和地区环境办公室可关注区域洪水的实时变化.

非接触式流量监测技术是一种全新的全天候流速流量自动测验技术, 其他技术无法替代, 国外研发成功这种应用产品, 可作为常规水文测验技术的补充或替代, 也是水文测验的发展趋势. 本文通过水利科技计划项目引入了非接触测流技术的示范应用.

## 1 技术原理

本文介绍一种名为 RQ30 的设备, 它采用的是非接触式雷达测量技术, 其主要原理是通过监测水位和流速参数, 结合水力学模型计算方法, 综合合成流量数据<sup>[1]</sup>.

RQ30 测流设备全天候野外在线工作, 野外防护等级达 IP 68. 雷达工作波段为 Ka 波段; 测速频率 24 GHz, 适应水流方向为顺流、逆流可选, 流速测量范围为 0.2 ~ 15 m/s; 水位测量范围达 30 m; 流速测量分辨率 1 mm/s; 水位测量分辨率 1 mm. 设备每 5 分钟自动测验一次河道流量.

以下分别描述设备工作原理.

### 1.1 表面流速监测

流速测量理论基础是基于电磁波的多普勒频移效应.

流速测量的原理如图 1 所示, 传感器利用专用支架安装在最高水位水面以上, 测流速雷达波与水平面成 58°角左右, 测量时仪器以 58°角向水面发送 Ka 波段 24 GHz 的雷达波, 这个雷达信号中一部分会被流动水面叠加一个频移分量并反射回到雷达天线中, 反射信号在经过可调滤波器后被记录和算出流速.

设河流水面波速为  $v$ , 观察点靠近波源速度为  $c$ , 则

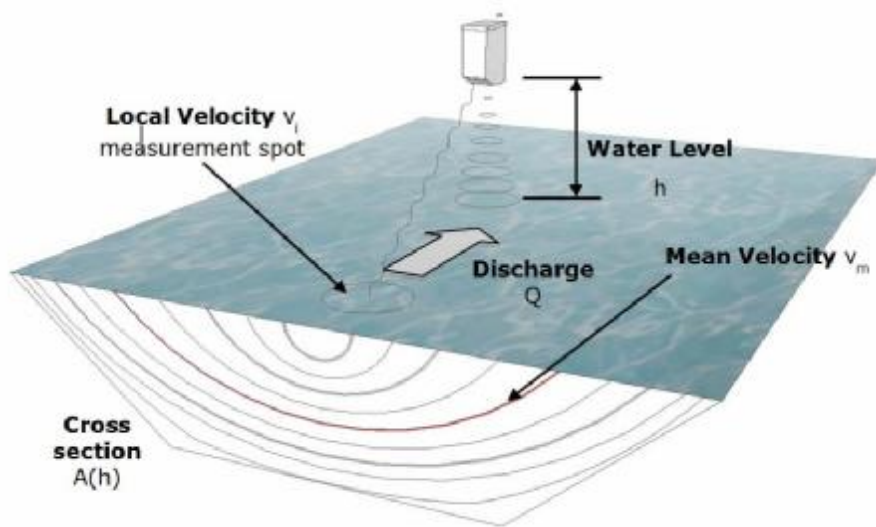


图 1 河道流量测量原理

单位时间内观测点将接收到  $(c+v)/\lambda$  个完整波形 (远离波源时  $v$  为负值), 即接收点频率为  $f'=(c+v)/\lambda$ ; 电磁波的多普勒效应可结合狭义相对论推出, 其结果为:

$$f' = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta\cos\theta} f \quad (1)$$

其中,  $\beta=v/c$ ,  $c$  为雷达波传播的速度 (即光速),  $\theta$  为所在点与波源连线到速度方向的夹角。易知上述公式中除  $\beta$  外均为已知量, 通过  $\beta$  可求出  $v$ , 即求出所测点的水流速度。

河流表层水流速度主要利用河流湍流和涌流产生的短波布拉格散射信息进行计算。主要原理如下: 当探头发射的雷达信息打到非光滑水的表面, 因厘米波长面波后向散射的作用, 将产生多普勒频移。在河水不流动时, 在厘米面波传播方向上会产生正向和负向多普勒频移。对于河流湍流散射而言, 正向和负向多普勒频移基本相等, 在河水不流动的情况下, 两者的均值为零。而对于流动的河流, 面波将随水流向下游传播, 从而产生多普勒频移叠加。因此, 通过对接收到的面波后向散射信息进行波谱分析即可获取表层水流速度<sup>[9]</sup>。

## 1.2 水位监测

水位测量利用 26 GHz (K 波段) 雷达波, 它的原理如图 1 所示, 雷达发射电磁波, 经水面反射, 经过时间  $t$  后接收器接收到反射波, 测得发射与接收的时间间隔  $t$ , 则距离  $h=ct/2$ , 以传感器测量点为基面则水位值为  $h$ 。若以河道底部为基面, 可设雷达传感器距河道底部高度为  $H$  (此参数在工程设施时可测得), 则水位  $d=H-h$ , 即  $d=H-ct/2$ , 其中仅有时间间隔  $t$  为未知参数, 由传感器测得时间间隔  $t$ , 即可算出水位值。水位精度可达到 1mm, 误

差范围为  $\pm 3\text{mm}$ 。

## 1.3 流量计算

流量测量的原理如图 2 所示, 图中  $h$  为雷达距水面高度,  $V_l$  为流速测量雷达测得的水表面流速,  $V_m$  为该截面的平均流速,  $A$  为截面积,  $A(h)$  表示截面积  $A$  与高度  $h$  之间的关系, 流量  $Q$  可以用式 (2) 计算得到:

$$Q = A(h) \cdot V_m \quad (2)$$

式中,  $A$  为截面积;  $V_m$  为通过截面积的流速。对于连续流在任意截面都有截面积是通过预置在传感器内部断面图与实际测得的水位推出。测速雷达测出测量点表面流速。平均流速  $V_m$  符合式 (3) 关系:

$$V_m = V_l \cdot k(h) \quad (3)$$

其中  $k$  是无量纲校正系数因子。最终, 流量测得结果可从式 (4) 得到:

$$Q = A(h) \cdot V_l \cdot k(h) \quad (4)$$

其中  $A(h)$  为截面积与水位  $h$  的关系, 一般可通过水位  $h$  与简单的几何学知识计算出来。由上述可知流量  $Q$  的精确值依赖于测得流速  $V_l$  与水位  $h$ , 相比较而言  $h$  易于测量,  $V_l$  一般也可较精确的测量, 因而影响精度的关键因素为  $k(h)$ 。

综上所述, RQ30 设备的测量流程就如图 2 所示, 测量基本过程为水位雷达传感器测得水位  $h$ , 表面流速雷达传感器测得表面流速  $V_l$ , 通过水位  $h$  结合传感器内部存储的河道剖面形状, 传感器会自动计算出截面积  $A$ 。同时, 通过水位  $h$  结合传感器内部存储的  $k-h$  对照表, 查找出对应水位的  $k$  值, 可计算出平均流速, 最后即可算出此断面流量  $Q$ <sup>[9]</sup>。

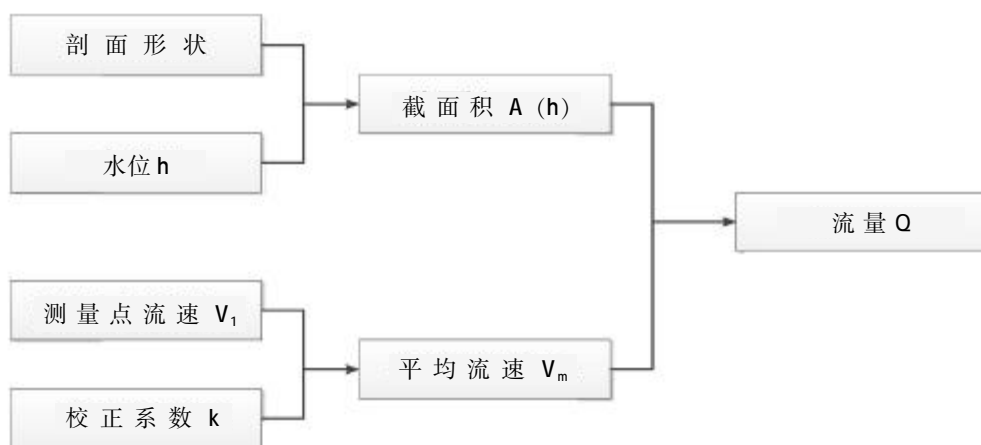


图2 RQ-30 流量计算流程图

## 2 率定校正

由上节可知,流量基本原理为通过测得选取点的流速,然后流量可通过公式(4)求得,其中引入一个校正因子  $k$ 。 $k$  是一个基于水位、剖面形状与流速的无量纲因子,其值为  $k=V_m/V_1$ 。其中  $V_m=Q/A$ ,即  $V_m$  为区域平均流速, $V_1$  为测量点的线性平均测量值或测量点的精确流速<sup>[9]</sup>。 $k$  系统保存在设备中,设备可提取  $k$  系数,结合流速和水位计算出流量,并自行校正输出流量值。

## 3 系统集成运用实例

RQ30 实时流量传感器已经在实践中得到应用,并且表现良好。以江西中小河流坳下坪水文站一个实际测量为例来解释测量流程。

江西坳下坪水文站是长江流域赣江水系遂川江二级支流禾源水上的小河水文站,位于江西省遂川县禾源镇禾源村,东经  $114^{\circ}25.6'$ ,北纬  $26^{\circ}11.2'$ ,集水面积  $86.4 \text{ km}^2$ ,距河口  $18.5 \text{ km}$ 。

经考察,选择该河流中一段较为顺直河段,其长度约为  $400 \text{ m}$ 。在河流一侧安装支架,支架采用可回旋式结构,高  $2.5 \text{ m}$ ,横臂长  $5 \text{ m}$ ,RQ30 设备通过卡箍固定在横臂顶端以利于测到中泓。因 RQ30 测流设备安装在上下游顺直段均分处,测验条件比较理想,河道断面图见图 3。此断面输入到 RQ30 测流设备中参加流量计算,另外 RQ30 的安装位置(以起点距计算)和河床的糙率等参数也要输入到 RQ30 测流设备中,使其对  $k$  值产生影响。

数据采集传输装置主控芯片采用 FREESCALE-S12 双核微处理器芯片,该芯片为军用级芯片,工作温度范围宽,可靠性高<sup>[9]</sup>。装置电路原理见图 4。

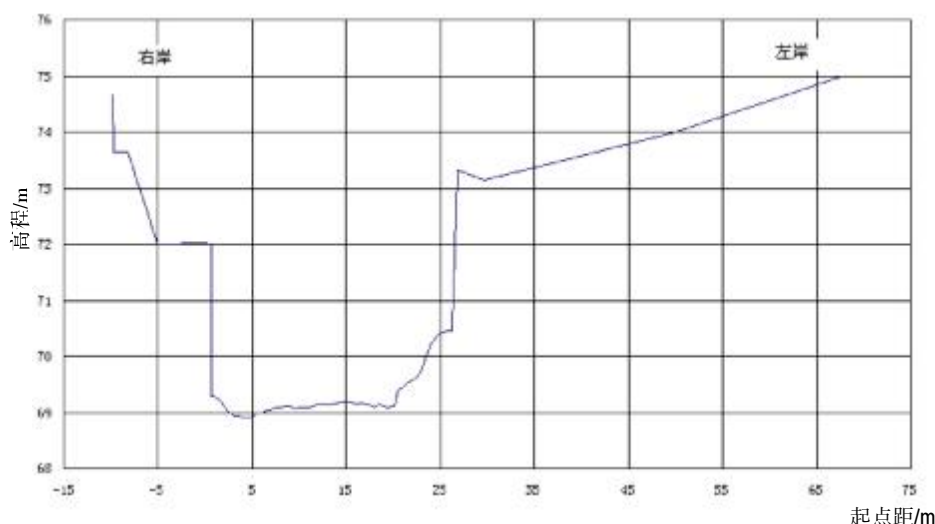


图3 测流应用断面图

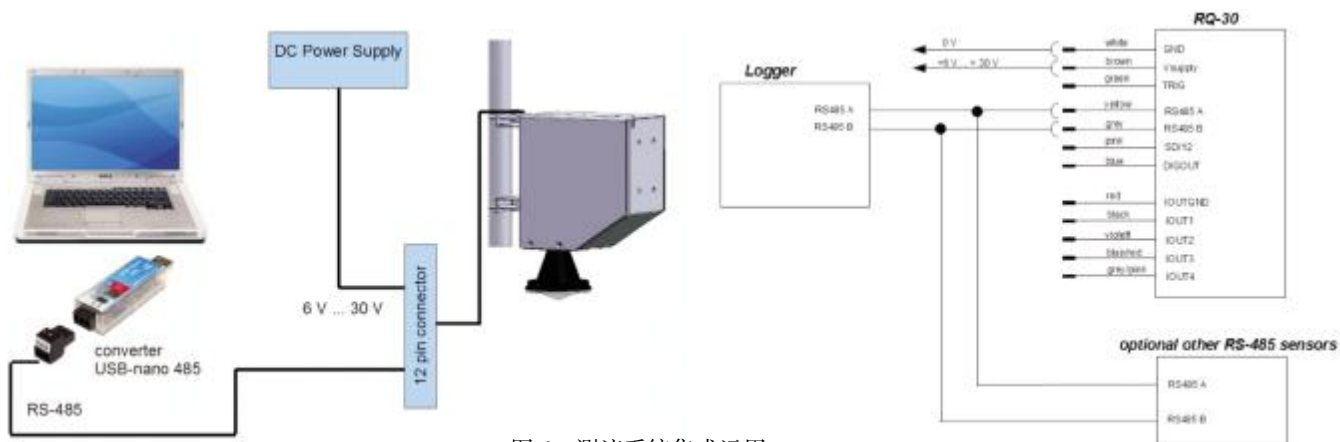


图 4 测流系统集成运用

通过 RQ30 监测到坳下坪站的一次突发洪水过程见图 5 和图 6。图 5 展示了该次洪水过程中水位、流速的实际的连续的监测数据,图 6 呈现了该装置自动结合断面面积和边坡糙率系数,通过水力学模型自动输出流

量的变化过程。

表 1 在 2013 年度测验数据中随机给出了设备从 2013-11-15 8:00 到 2013-11-15 13:00 的数据,进行误差分析,统计平均误差结果在 4%之内。

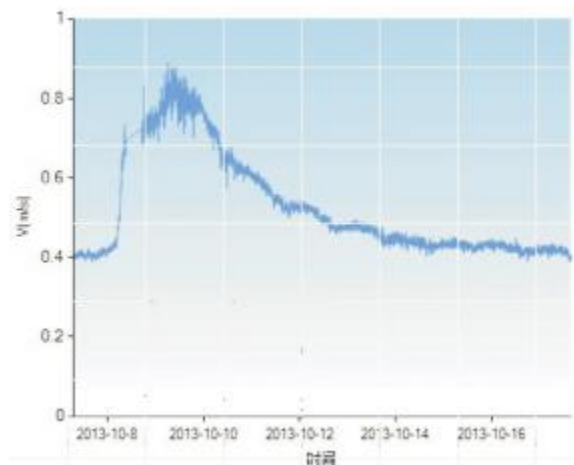
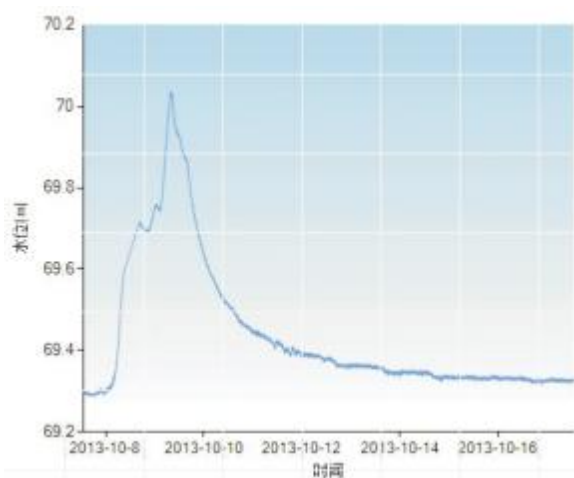


图 5 水位和流速的监测实例图

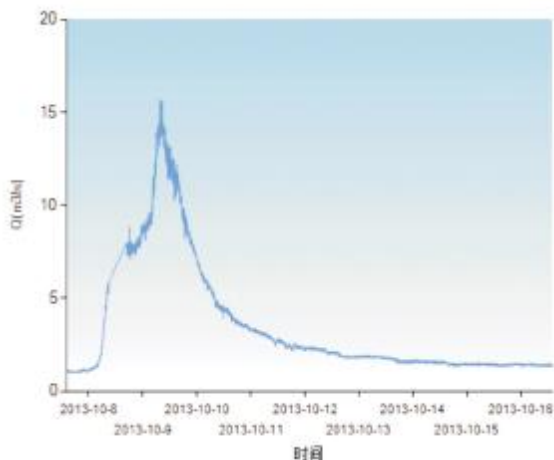


图 6 测流装置流量计算成果图

## 4 结语

流量是水利工程及水文分析中最重要的资料,在水资源管理、防汛抗旱以及水利工程建设方面均需要准确、丰富的流量资料作参考。本文理论分析了 RQ30 流量传感器技术原理及其应用,并通过实例开展山洪水位、流速和流量的连续监测,为山洪灾害防治提供决策依据。

非接触式测量在水文测量中具有一定的优势,山洪灾害发生地区水文测验条件极其恶劣,在常规水文测验无法实现高流速下的洪水流量水位自动监测的情况下利用该技术可实现连续监测和随时应急监测,满足水文

表 1 设备数据与缆道定线数据对比分析

时间	水位高程/m	流速/(m/s)	实测流量/(m³/s)	缆道数据/(m³/s)	误差分析
2013-11-15 8:00	69.358	0.44	1.67	1.66-1.78	在区间内
2013-11-15 8:15	69.353	0.449	1.66	1.66-1.78	在区间内
2013-11-15 8:30	69.362	0.442	1.71	1.78-1.90	3.93%
2013-11-15 8:45	69.351	0.444	1.63	1.66-1.78	1.81%
2013-11-15 9:00	69.357	0.452	1.71	1.66-1.78	在区间内
2013-11-15 9:15	69.353	0.436	1.62	1.66-1.78	2.41%
2013-11-15 9:30	69.35	0.437	1.59	1.54-1.66	在区间内
2013-11-15 9:45	69.352	0.445	1.64	1.66-1.78	1.20%
2013-11-15 10:00	69.351	0.453	1.66	1.66-1.78	在区间内
2013-11-15 10:15	69.348	0.432	1.56	1.54-1.66	在区间内
2013-11-15 10:30	69.353	0.44	1.63	1.66-1.78	1.81%
2013-11-15 10:45	69.352	0.444	1.64	1.66-1.78	1.20%
2013-11-15 11:00	69.356	0.437	1.65	1.66-1.78	0.60%
2013-11-15 11:15	69.351	0.444	1.64	1.66-1.78	1.20%
2013-11-15 11:30	69.352	0.457	1.69	1.66-1.78	在区间内
2013-11-15 11:35	69.347	0.458	1.64	1.54-1.66	在区间内
2013-11-15 11:40	69.353	0.439	1.63	1.66-1.78	1.81%
2013-11-15 12:00	69.347	0.442	1.58	1.54-1.66	在区间内
2013-11-15 12:15	69.351	0.44	1.61	1.66-1.78	3.01%
2013-11-15 12:30	69.349	0.438	1.59	1.54-1.66	在区间内
2013-11-15 12:45	69.348	0.438	1.58	1.54-1.66	在区间内
2013-11-15 13:00	69.348	0.444	1.6	1.54-1.66	在区间内

及防汛部门对山洪灾害监测的及时性需求。非接触式雷达流量测验系统不受气候、测量手段、测量安全、回应时间等限制,很容易在洪水期进行流量测验。

传统的流量测验方法在 20 世纪中发挥了重要作用,但流量测验手段都是基于接触式测量,无论是缆道还是 ADCP 测流,人员及设备都存在安全隐患,受其他因素影响及误差来源均较多。因此在突发高水位时流量测验工作中比较困难,又由于高水位时的流量资料样本缺乏,整编时只能采用高水位延长的方法推算流量。非接触式雷达流量测验系统可获取实测流量过程线。同时,该系统可对水位~流量曲线进行率定和定期修正,不需花费大量的人力物力就可获得满意的效果,有一定的

应用前景。

参考文献：

[1] RQ-30 Measurement References Document release: V1.0.0 [R],Sommer Mess-Systemtechnik, 2012

[2] 卢善龙,吴炳芳.河川径流遥感监测研究进展[J]. 地球科学进展, 2010 (8):821.

[3] SIMK® - Calibration of Stream flow -Gauging Stations in Rivers and Canals[R], 2012

[4] 罗国政,王君善.水文站高洪测验水面流速系数分析研究[J].陕西水利, 2012(4).

[5] 孙同景,陈桂友. Freescale 9S12 十六位单片机原理及嵌入式开发技术 [M].北京:机械工业出版社,2008: 1-24.

## A non-contact real-time discharge measurement technology of sudden freshets

LI Shi-qin<sup>1</sup>, LUO Man-na<sup>2</sup>, WANG Jiang-yan<sup>3</sup>, WANG Ji-xing<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Provincial Hydrology Bureau, Nanchang 330002, China;

2. Poyang Lake Hydrology Bureau of Jiangxi Province, Jiujiang 332000, China;

3. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing Jiangsu 210012, China)

**Abstract:** Compared with traditional discharge monitoring, a way of non-contact discharge measurement is put forward. The main characteristics of non-contact radar flow sensor was introduced. The implementation method of radar flow sensor and its monitoring system based on non-contact measurement theory were stated. In order to make the follow-up popularization and application, the on-line discharge monitoring transmission system based on non-contact discharge sensor was designed and its practical application was analyzed.

**Key words:** Freshet; Non-contact discharge measurement; RQ30 discharge measurement equipment

编辑: 张绍付

(上接第 102 页)

## 5 结语

(1) 在分析其它学者研究成果的基础上, 进行了塑料模型沙特性试验, 选取经过加工处理后的轻质塑料沙为模型沙, 该沙比重较轻、适合变率大的动床模型。模型选沙为模型的设计提供了可靠的依据, 也为模型验证及试验研究提供了有利条件。

(2) 根据塑料沙的容重和模型比尺, 综合各种研究成果提出了鄱阳湖实体模型沙粒径比尺的初步设计, 再按照原形沙的特性及级配曲线, 初步确定了鄱阳湖模型沙的级配曲线图。

(3) 结合水槽试验, 对塑料沙进行了起动流速试验, 并和国内几种塑料轻质沙起动流速计算公式对比, 推荐的塑料沙起动流速公式计算结果较为合理, 选取的模型

沙满足起动流速相似条件, 为保证动床模型模拟精度奠定了基础。动床含沙量比尺及河床冲淤时间比尺需要通过实际放水观测冲淤演变并与原型结果对比, 进行调整确定, 直到模型变形和原型相似满意为止。

## 参考文献:

- [1] 何文社, 方铎, 刘有录. 黄河包头河段泥沙模型设计[J]. 泥沙研究, 2000, (4): 69-73.
- [2] 乐培九, 刘万利. 动床模型粒径比尺的确定方法[J]. 水道港口, 2008, 29(5): 333-337.
- [3] 李昌华, 吴道文, 夏云峰. 平原细沙河流动床泥沙模型试验的模型相似律及设计方法[J]. 水利水运工程学报, 2003, (1): 1-8.0
- [4] 陈俊杰, 任艳粉等. 常用模型沙基本特性研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [5] 王延贵, 胡春宏, 朱毕生. 模型沙起动流速公式的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 518-523.

## Design of the entity movable bed model of Poyang Lake

HUANG Zhi-wen, WU Nian-hua, XU Xin-fa

(Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** The selection of model sediment is the key factor in the design of movable bed model. In view of high variable rate of Poyang Lake model and the fine sand into lake, the light model sand should be adopted in movable bed model. Combined with the flume starting velocity test, the size scale of model sand was preliminarily designed by using the research results of the similarity of sediment movement condition. The suitable model sand was selected. The incipient velocity formula of plastic model sand was proposed to estimate incipient velocity of plastic sediment, combined with several domestic lightweight formula of incipient velocity. The selected model sand meet the similarity of incipient velocity and the similar scale is reasonable. This lays a foundation for improving the simulation accuracy of movable bed model test.

**Key words:** Poyang Lake; Entity model; Light weight plastic sand; Movable bed design

编辑: 张绍付