2019年12月

Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research

December, 2019

文章编号:1672-3031(2019)06-0439-07

# 基于图像识别技术的土石料级配检测系统

摘要:本文开发了一种基于图像识别技术的土石料粒径级配检测系统。该系统修建在土石料填筑现场,通过对车辆运送的土石料进行拍照,将图片传输到识别系统,采用图像识别技术,分析土石料粒径并绘制级配曲线以判断土石料是否满足设计包络线要求。在此基础上,设计建造了一个小型土石料粒径识别系统样机,选取不同粒径范围的石英岩土石料,将图像识别得到的级配曲线与传统人工筛分法得到的级配曲线进行对比,发现二者级配曲线吻合度较好。表明本文开发的土石料级配检测系统是稳定可靠的,可以运用于现场坝料级配检测。

关键词: 土石料级配; 图像识别技术; 快速检测系统

中图分类号: TP751

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.06.006

## 1 研究背景

土石料是水利、公路、铁路及建筑工程的主要建筑材料。级配是影响土石料压实后力学性能的重要因素。为了保证填方工程的压实质量,提高抗变形能力和抗渗性能,采用级配合理的填料尤为重要。如何快速、准确检测并判断填筑土石料的级配的合理性一直是工程界关注的焦点问题。传统的土石料级配检测首先通过人工随机抽取,进而采用人工筛分或摇筛机对土石料进行筛分,然后由人工统计获得级配曲线[1-2]。该方法虽然技术成熟,但是费时、费力、代表性不强,与现行的高效机械化填筑施工不相配套,无法快速进行大量填筑土石料的检测。目前,针对大量土石料级配进行快速检测的方法较少,但是级配检测又是工程中迫切需要的。因此,亟需开发一种应用于大量土石料粒径级配检测的高效、便捷方法。

目前,成熟可靠的级配快速检测的方法并不多,很多学者尝试通过拍照然后进行图形、图像识别进而对级配粒径进行检测。与此相关的研究主要集中在泥沙形状、岩石组分、矿石粒度、沥青均匀性、混凝土骨料形状、粒度的检测等方面。Norbert H. Maerz<sup>[3]</sup>于2004年设计了一种基于视觉的集料形状测定系统,该系统能够快速、客观、高效地测定集料颗粒形状特征。法国的公共设施实验室LCPC开发了VDG-40 Videograder系统<sup>[4-5]</sup>,该系统可以自动获取集料的级配以及集料颗粒的针片状含量。Bouquety等于2006年运用VDG-40 Videograder分析了122个集料样本,通过辅助数据对VDG-40的性能进行了验证<sup>[6]</sup>。2007年美国机器视觉实验室的Lee J.R.J等开发了从粗粒料颗粒表面采集分析颗粒的三维数据的系统,当粗粒料从传送带上面通过时,利用激光三角测量法从上面采集颗粒的上半球数据,对颗粒三维尺寸和形状的计算方法进行了描述<sup>[7]</sup>。于庆磊等<sup>[8]</sup>提出了一种岩石非均匀性表征技术,依据的是数字图像处理理论。黄志辉<sup>[9]</sup>应用分形理论、摄影技术、计算机图像处理技术建立了求算爆堆各级岩块组成的分形测试方法。朱涛<sup>[10]</sup>运用计算机图像检测技术实时采集岩石骨料图像,进而实时处理和分析这些图像。孙东坡<sup>[11]</sup>利用图像识别技术测定了室内冲刷试验的水流携沙的特征,确定推移质泥沙的输砂率。许琳娟<sup>[12]</sup>利用图像识别技术测定了室内冲刷试验的水流携沙的特征,确定推移质泥沙的输砂率。许琳娟<sup>[12]</sup>利用图像处理技术进行水槽试验泥沙轮廓及位置的提取,并采用不同的边缘检测算法对比了不同颗粒尺寸泥沙的识别效果。刘明潇<sup>[13]</sup>利用图像识别等技

收稿日期: 2019-01-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2018YFC0407103); 中国水利水电科学研究院基本科研项目(GE0145B0112017)

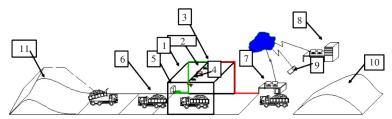
作者简介:于沭(1983-),高级工程师,主要从事土石坝安全及风险防控研究。E-mail: yushu@iwhr.com

术通过对输沙量的同步监测,研究了粗细颗粒间相互作用对非均匀沙输移的影响。夏军武<sup>[14]</sup>基于水泥颗粒与所包含图像像素的参数关系,利用颗粒移动后像素变化规律,实现水泥颗粒的密实填充。蔡改贫<sup>[15]</sup>、张国英<sup>[16]</sup>利用图像识别方法进行了矿石粒度及原矿碎石粒度的检测。彭勇等<sup>[17]</sup>利用数字图像处理技术对定量描述沥青混合料均匀性的方法进行了研究,提出了描述混合料均匀性的指标参数。图像识别技术方兴未艾,已经在水利行业有所尝试,可以成为坝料级配检测的一种快速、有效手段。土石料与矿石、泥沙、混凝土骨料具有几何特征上的相似性,利用图像识别技术进行土石料粒径级配的检测具有技术上的可行性。

本文针对土石料级配检测方法问题,开发了土石料级配快速检测系统,缩小尺寸加工制作了检测样机,针对典型石英岩土石料级配进行了检测,并与筛分结果进行了对比,验证了级配快速检测结果的可靠性。与传统筛分法级配检测相比,该方法无需复杂的筛分设备,检测速度快,并利用工程场地现有施工环节布置检测系统,无需额外增加工序,可以在实际工程中实现土石料级配快速检测。

# 2 土石料级配快速检测系统

为了保证土石料的碾压质量,在碾压前通常要对其加一定量水起润滑作用。这一加水环节通常在土石料的运输过程中完成。具体加水方法是让土石料运输车经过一个喷淋房,在喷淋房停留一段时间进行加水。本文提出的土石料级配快速检测系统利用这一施工环节进行开发。主要思路是当装载了土石料的运输车在喷淋房停稳后,即对车载土石料进行拍摄。在拍摄后检测系统即对土石料表面级配进行检测,在预设的合理级配包络线内即认为该车土石料为合格料,由运输车送往施工场地的同时,通过车载 GPS 记录合格料运输车在填方体卸料的位置;如超出级配包络线即认为是不合格料,同时给出某个粒径范围内土料超标或不足的评价结果,运输车返回料场与缺少粒径范围的土料进行重新拌和,使其尽量满足合理级配要求并重新进行检测。现场布置如图 1 所示,检测系统技术路线图如图 2 所示。该方法具有无需增加施工环节、填筑工作效率高和施工成本低等优点。



注: 1表示检测站,2表示工业相机,3表示LED灯,4表示加湿喷头,5表示供水系统,6表示装满砂石料的工程运输车,7表示工程现场数据处理及存储终端,8表示远程终端及存储系统,9表示移动终端,10表示土石料堆料场,11表示筑坝现场。图1 土石料粒径检测思路示意图

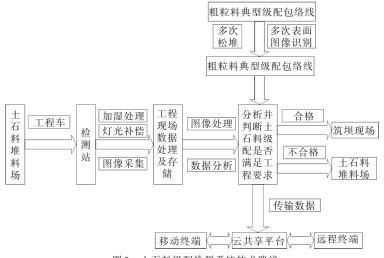


图 2 土石料级配检测系统技术路线

# 3 级配检测系统样机

3.1 硬件部分 按照上一节提出的级配检测思路,制作了基于图像识别技术的土石料粒径快速检测系统小型检测系统样机,该样机为后续在工程现场实施提供借鉴参考。检测样机外观及结构如图 3 所示,图中①表示检测样机,整体架构为铝合金材质;②表示供水系统;③表示装载土石料的工程运输车模型;④为检测系统控制器,包括:进出门控制、灯光控制、喷淋控制模块;⑤表示 LED 灯,被测目标移动速度较快、需要较高照度,设计定制了 LED 照明系统,具有高照度、高光效、高显色性及寿命长等特点。光源具体技术参数:色温:5500 K;显色指数 Ra:80;平均寿命:50 000 h;功率:140W×2;光通量:3200 Lm×2;⑥表示工业相机,为提取车斗内部的土石料形状的等特征信息,要求相机具有稳定可靠的性能,本样机选择了 Basler公司的 acA1920-50gc 相机。具体参数如下:感光芯片尺寸:11.3 mm×7.1 mm;芯片类型:CMOS;水平/垂直像素尺寸:5.86 μm×5.86 μm;帧速:50 fps;分辨率:2.3 MP。⑦表示系统检测软件及存储终端,软件界面如图 5 所示;⑧为喷淋喷头。



图 3 土石料级配快速检测模型示意图

**3.2 检测系统算法及软件部分** 级配检测的算法思路主要是先将图像中的土石料颗粒进行分割,通过像素点数量和单像素代表的长度测算颗粒的特征尺寸。利用图像识别获取的土石料几何特征面积S和周长P得到石块区域外接匹配椭圆形长轴a和短轴b,进而计算土石方图像中石块粒径d。

$$a = 0.5 \times \left(\frac{P}{\pi} + \sqrt{\frac{P^2}{\pi^2} - \frac{4S}{\pi}}\right)$$
 (1)

$$b = 0.5 \times \left(\frac{P}{\pi} - \sqrt{\frac{P^2}{\pi^2} - \frac{4S}{\pi}}\right)$$
 (2)

土石料粒径 d 为:

$$d = 1.16b\sqrt{1.35a/b} \tag{3}$$

将颗粒形状假设成椭球,以 d 作为对应筛分试验可以过筛的尺寸。统计各个粒径范围内的颗粒数,根据椭球体积计算公式计算每个颗粒的体积,并假设所有土石颗粒的密度为同一值,体积转化为质量。以每一组粒径范围内颗粒数量乘以单颗粒质量作为这一粒组内的质量。根据各个粒组质量占总质量百分比绘制土石料石块的级配曲线。

图 4是图像处理过程中每一步图像变化示意图。图像中土颗粒分割算法一共分为8个步骤。第1步为土石料照片原图;第2步为灰度均衡处理,将初始图像处理成直方图均匀分布的灰度图像,增强对比度,使原来不清晰的图像变得清晰;第3步为双边滤镜处理,指的是去除图像噪声,同时保留图像边缘,去除由灰尘及光照不均带来的干扰;第4步为阈值化处理,采用OTSU及局部双窗阈值优化的方法,将目标与背景区分,生成二值图像;第5步为八链码处理,查找连通区域,填充目标孔洞,将二值图像去除目标内部噪声,标记目标边界;第6步为变换距离处理,将二值图像的前景目标灰度

化,求得图像局部最大值,使图像呈现出立体化的山峰状;第7步为重构图像处理,去掉距离变换形成的多余峰头而导致的过分割,提取种子区域;第8步为分水岭处理,根据形态学梯度图像进行分水岭分割,得到图像目标边界。

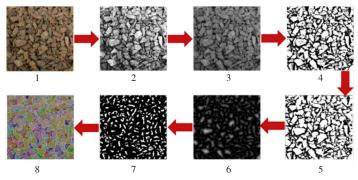


图 4 土石料图像识别算法过程

级配检测系统软件部分界面如图 5 所示,主要包括菜单栏、显示窗口、工具栏、检测状态等几个部分。菜单栏内主要包括检测过程的分步控制选项;显示窗口主要显示工业相机采集到的图片(图 5 中①)、滤波处理后的图片(图 5 中②)、八链码处理后的图片(图 5 中③)、以及检测出的级配曲线(图 5 中④);工具箱主要为调整算法中使用的参数;过程控制栏主要显示检测过程状态。处理软件具有计算速度快、效率高的特点,能够在1秒内识别图像并绘制相应的土颗粒级配曲线,在大批量图像数据的识别处理具有较突出的优势。

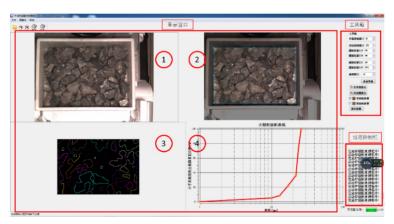


图 5 级配检测系统软件界面

# 4 测试及结果分析

4.1 测试土石料 通过对不同岩性土石料进行大量测试表明,同一种图像识别算法对于岩性不同的 土石料不一定适用,由于其颜色和形状的差异,不同土石料的识别算法及参数也相应进行调整。石 英岩在自然界中广泛存在,是广泛使用的填筑材料。又因石英岩具有棱角分明、色彩多样,相对识别难度较大,本文以石英岩作为典型测试料进行级配检测测试。考虑到工程实际检测系统与小型样机的尺寸比例大约为5~10倍,因此,检测土石料的尺寸也相应进行缩小,控制最大粒径小于等于60 mm。通过标准筛对土石料进行筛分,分别选择粒径分布在10~20 mm、20~40 mm、40~60 mm及最大粒径小于等于60 mm的混合级配的土石料。前3组为窄级配料,第4组为宽级配料。由于前3组粒径范围无法通过标准筛再对其粒径进行筛分,假定前3组土石料在其粒径范围内呈均匀分布,各粒径的颗粒形状如图6所示。图6中的白色塑料箱模拟运输车的车厢并放置于汽车模型中,并停放于工业相机下方(图3),通过检测系统软件进行拍照检测。

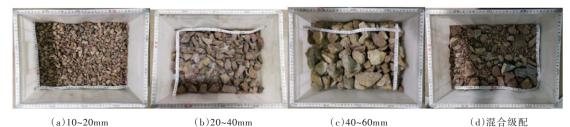


图 6 不同粒径分布的石英岩样本图

tUmm (c)40~00mm (d)化百级的

**4.2 检测结果分析** 将采用图像识别检测系统与筛分方法获得的级配曲线进行对比,采用两种方法检测结果特征粒径误差作为评价指标,各粒组土石料得到的级配曲线如图 7 所示,特征粒径指标如表 1 所示。对于窄粒径范围的  $10\sim20~\mathrm{mm}$ 、 $20\sim40~\mathrm{mm}$ 、 $40\sim60~\mathrm{mm}$ 三种级配土石料,图像识别得到的级配曲线与均匀分布级配曲线拟合良好,级配曲线比较接近。3 组窄级配特征粒径的  $d_{60}$ 、 $d_{30}$ 值的误差最大为  $3.7~\mathrm{mm}$ , $d_{10}$ 值最大误差为  $12.9~\mathrm{mm}$ 。 $d_{10}$ 值误差相对较大,其产生的原因为图像识别检测程序是以  $1~\mathrm{mm}$  粒径作为最小粒径,上述 3 组窄粒径范围的级配料缺少本组最小粒径到  $1~\mathrm{mm}$  粒径的土颗粒,使得这一部分的级配检测结果误差较大。如  $20\sim40~\mathrm{mm}$  粒组,缺少  $1\sim20~\mathrm{mm}$  粒径的颗粒,这一粒径范围内的识别结果主要由土粒中的石英、云母等矿物颗粒被误识别产生的。实际工程中堆石料或砂砾石料,完全缺少细粒的土料极少出现,因此, $d_{10}$  检测结果的误差基本不影响工程应用。宽级配料各特征粒径的图像识别结果和筛分结果相差都很小,最大误差为特征粒径 $d_{60}$ ,其值为  $9~\mathrm{mm}$ 。宽级配料的检测误差随着特征粒径的减小呈现减小趋势,特征粒径  $d_{10}$  的误差仅为  $0.1~\mathrm{mm}$ 。

在实际工程应用中,土石料级配曲线一般是在设计级配包络线范围内变化的,其特征粒径允许范围较大。如文献中建议的堆石料级配包络线 $d_{60}$ 粒径范围为 80~250 mm, $d_{30}$ 粒径范围为 20~80 mm, $d_{10}$ 粒径范围为 0.5~12 mm  $^{[18]}$ 。本文提出的图像识别检测方法的误差远小于对应特征粒径的范围上下限差值,识别结果造成的误差不会对级配有较大影响,可以满足工程需要。

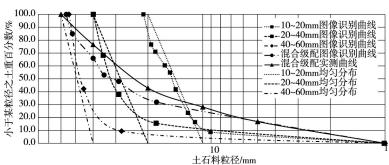


图 7 不同粒径分布的石英岩级配曲线图

表1 不同粒径分布的石英岩特征级配指标

(单位: mm)

|       |      | 特征粒径     |           |           |
|-------|------|----------|-----------|-----------|
|       | _    | 限制粒径 d60 | 30%粒径 🖽 💮 | 有效粒径 🛭 10 |
| 10~20 | 筛分检测 | 15.2     | 12.3      | 10.7      |
|       | 图像识别 | 16.0     | 12.8      | 9.7       |
|       | 误差   | 0.9      | 0.5       | 1.0       |
| 20~40 | 筛分检测 | 30.3     | 24.6      | 21.4      |
|       | 图像识别 | 33.9     | 26.4      | 8.5       |
|       | 误差   | 3.5      | 1.8       | 12.9      |
| 40~60 | 筛分检测 | 51.1     | 45.2      | 41.6      |
|       | 图像识别 | 48.9     | 41.6      | 29.0      |
|       | 误差   | 2.2      | 3.7       | 12.6      |
| 混合级配  | 筛分检测 | 29.3     | 11.1      | 2.7       |
|       | 图像识别 | 37.6     | 15.4      | 2.6       |
|       | 误差   | 8.3      | 4.4       | 0.1       |

# 5 结论

- (1)本文开发了一个基于图像识别技术的土石料级配快速检测系统,设计了所需的软硬件设备,并设计加工制作了一台检测样机。进行了4个不同粒径范围石英岩堆石料的级配检测对比,系统检测结果与人工筛分检测结果的特征粒径最大误差为9 mm,误差量值远小于测量的粒径范围,基本可以满足级配检测工程应用需要,表明级配检测系统的测试结果是基本可靠的,且能明显提高级配检测速度。
- (2)现阶段研究发现,不同岩性、形状土石料的采用的检测算法和参数有所差别,同一套算法参数不具有普适性。使用本检测系统前应根据土石料母岩特性、颗粒形状的特点对图像识别的一些参数重新进行率定。
- (3)在工程现场使用本文开发的图像识别级配检测系统时,应根据具体光线条件、运输车辆尺寸等对工业相机数量、参数及光源进行选型调整。

#### 参考文献:

- [1] 国家质量技术监督局,中华人民共和国建设部.GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [ 2 ] KAYE B H . Particle Size Characterization [M] . Handbook of Powder Science & Technology . Springer US, 1997 .
- [ 3 ] NORBERT H. Maerz. Technical and computational aspects of the measurement of aggregate shape by digital image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004: 10-18.
- [ 4 ] PROWELL, BRIAN D. Weingart, Randy. Precisions of flat and elongated particle tests: ASTM D4791 and VDG-40 videograder[J]. Transportation Research Record, 1999, n1673: 73-80.
- [ 5 ] BROWNE C, RAUCH F A, HAAS T C, KIM H. Comparison tests of automated equipment for analyzing aggregate gradation [C]//Proceedings of the 9th Annual Symposium of the International Center for Aggregates Research (ICAR), Austin, TX, 2001.
- [ 6 ] BOUQUETY M N, DESCANTES Y. BARCELO L, et al. Automated measurement of aggregate properties: Part 2-flakiness index[J]. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2006, 39(285): 13—19.
- [ 7 ] LEE JR J, SMITH ML, SMITH LN. new approach to the three-dimensional quantification of angularity using image analysis of the size and form of coarse aggregates [J]. Engineering Geology, 2007, 91(2): 254-264.
- [8] 于庆磊, 唐春安, 唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 2(3): 551-559.
- [9] 黄志辉.台阶爆破块度分布测定及其优化研究[D].泉州:华侨大学,2005.
- [10] 朱涛.基于图像的碎石料测量与统计方法研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [11] 孙东坡, 高昂, 刘明潇, 等. 基于图像识别的推移质输沙率检测技术研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34 (9): 85-91.
- [12] 许琳娟,曹文洪,刘春晶.基于图像处理的泥沙轮廓提取对比分析[J].中国水利水电科学研究院学报, 2015,13(1):28-33.
- [13] 刘明潇,孙东坡,王鹏涛,赵亚飞,韩力球.双峰型非均匀沙粗细颗粒相互作用对推移质输移的影响[J]. 水利学报,2015,46(7):819-827.
- [14] 夏军武, 孙克纬, 赵海涛. 水泥基材料微观分析模型颗粒与像素关系研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 865-872.
- [15] 蔡改贫,李龙茂,姜志宏.基于图像处理的矿石粒度检测系统设计[J].冶金自动化,2013,37(6):63-66.
- [16] 张国英, 邱波, 刘冠洲, 等. 基于图像的原矿碎石粒度检测与分析系统[J]. 冶金自动化, 2012, 36(3): 63-67.
- [17] 彭勇,孙立军,王元清,等.数字图像处理在沥青混合料均匀性评价中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版),2007,37(2):334-337.
- [18] 朱晟,钟春欣,郑希镭,等.堆石体的填筑标准与级配优化研究[J].岩土工程学报,2018,40(1): 108-115.

#### Gradation testing system of rockfill material based on image recognition technology

YU Shu<sup>1</sup>, WEN Yanfeng<sup>1</sup>, WANG Yujie<sup>1</sup>, ZHANG Guoying<sup>2</sup>, ZHANG Yanyi<sup>1</sup>, DENG Gang<sup>1</sup>
(1. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper develops a rockfill material size gradation testing system based on image recognition technology. The system is built on the rockfill filling site, through the multi-faceted photographing of the rockfill materials transported by the vehicle, the picture is transmitted to the identification system, and the image recognition technology is used to analyze the particle size of the rockfill and draw a gradation curve to determine whether the rockfill materials meet the design requirements. Based on this, a small particle size identification system for rockfill materials is established, and quartzite materials with different particle size ranges are selected. The gradation curve obtained by image recognition technology is compared with the gradation curve obtained by traditional artificial screening method. Two gradation curves have a good degree of agreement. It is proved that the gradation testing system developed in this paper is stable and reliable, and can be applied to actual engineering rockfill material gradation testing.

Keywords: the gradation of rockfill materials; image recognition technology; rapid detection system

(责任编辑:耿庆斋)

(上接第438页)

## Construction and application of hydraulic machinery R&D platform

LU Li, PAN Luoping, PENG Zhongnian, XU Hongquan, MENG Xiaochao, GAO Zhongxin

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research 100038, Beijing)

Abstract: The research and development platform for hydraulic machinery of IWHR is built based on the construction of a new model test stands of hydraulic machinery, combined with the development and application of CFD numerical simulation technology, and using modern computer technology & testing technology. During the construction of the platform, innovative methods and techniques were proposed in such areas as comparative test, torque test of tubular turbine, measurement of sediment water concentration and net head, CFD numerical simulation and abrasion prediction of solid-liquid two-phase flow, so that the test function and testing precision of the test stands have reached the international leading level. With this platform, a large number of outstanding hydraulic machinery model runners, anti-wear materials and operating stability technology have been developed and designed, which are widely used in the construction and renovation of water and hydropower project. The comparative tests among the turbines in super hydropower station such as Three Gorges Right Bank, Xiluodu, Xiangjiaba, and the pump-turbines in Jiangsu Liyang and Zhejiang Xianju pumped storage power station were carried out on the test rig. Additionally, model acceptance tests of turbines and pump turbines for more than a dozen of large and medium-sized hydropower stations in china and abroad such as Jinping first stage hydropower station, Turkish OBRUK Hydropower station, and NAM-LIK hydropower station in Laos are completed on this test rig. This research project has promoted the improvement of the performance level of hydraulic turbines, pump-turbines and the progress of hydraulic machinery model testing technology.

**Keywords:** hydraulic machinery; research and development platform; solid-liquid two-phase flow; engineering application; CFD numerical simulation

(责任编辑:杨 虹)

2019年12月

Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research

December, 2019

文章编号:1672-3031(2019)06-0446-05

# 水工模型试验中测压排测值图像数字处理方法

刘彧1,周琦2,于汪洋2

(1. 中国水利水电科学研究院 标准化研究中心, 北京 100038; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:时均压强在水力学模型试验研究中是一项非常重要的数据参数。测压排是水力学模型试验中测量时均压强最直观最经济的一种测量工具。本文结合白鹤滩大型水电站泄洪消能的对比方案进行物理模型试验,开发了以测压排时均压力测量系统为基础的数字图像处理程序,从原始的实测图像中的坡度值入手,设计了一种更为便捷可行的数据自动读取方法,通过在软件平台上进行工具模块的集成,从而达到批量化自动处理测压管水头数据,得到时均压强结果的目的。经过应用实例的检测表明:数字图像处理技术较好的解决了传统方法人工读数工作量大的问题,而且切实可行、高效。

关键词:水工模型试验;测压排水位;数字图像处理;时均压强值

中图分类号: TV131.6

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.06.007

### 1 研究背景

在水电站泄洪消能模型试验中,对于冲击压强的测定是一个很常见的试验内容。时均压强是一项非常重要的数据参数,一般来讲,测压排是水工水力学模型试验中测量时均压强最直观简便的一种测量工具,传统的测压排数据处理方法,是根据测压排后面的刻度纸进行直接读数的较为原始、机械重复的人工读数方法。

在近年来的试验手段中,也较常使用传感仪进行测量,虽然可以直接测得测点的脉动过程来进行分析统计,但是在测点较多的模型试验中就显得成本非常高,并且实时数据也不如直接通过测压排观察直观可辨。不少研究人员对如何对测压排进行自动读数开展了研究,目前有通过在测压管水面放置有色小球,在照片中可以发现水注的顶端由于有色小球的亮度值较高,可以比较容易的实现测压排数据的自动读取[1-2],但是放置有色小球可能会导致工作量的增加及水面的高度变化,因此如何不对水面进行特殊处理而进行数据处理是一个需要解决的问题。

本文主要阐述了在白鹤滩水力学模型试验<sup>[3-5]</sup>中,以测压排的直接读数为基础,在没有对测压排进行特殊操作的情况下,通过对照片数字图像处理来进行水面的自动识别,从而实现测压排水柱的高度的自动读取。该方法对现有的测压排直接读数手段进行了改进,并可以实现批量化处理实验数据。

### 2 测压排测值图像数字处理方法

测压排是水力学实验中测量时均压强最直观最实用的一种方法,它能读取一定时间内的最大值和最小值用于分析平均值,但测压管测量方法本身具有一定的缺陷,如测压管对流动有阻尼不易获得最大压力值,布置有一定密度限制且不易更改等,实际操作中可通过改进测压排及连接管材质或者加大布置的密度来改进,也会因此加大数据读取的工作量,而且很难精确;为了改进这个缺点,数字图像自动处理技术的应用掌握必不可少。自动读取法主要是通过对AreGIS进行程序的编写,从而对测压排照片进行数字图像预处理,最后达到可以批量省时省力处理测压排读数的过程。

收稿日期: 2018-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679121)

作者简介:刘彧(1987-),工程师,主要从事水工水力学、水利标准化研究。E-mail: liuyu87@iwhr.com

2.1 方法简介 测压排压力值是通过照片或实时摄像对其进行观测并读数的,在充分研究测压排的图片特征后,可以发现测压管水柱与空气界面亮度值的差异显著,即玻璃管中有水的部分亮度值较高,而没有水的部分亮度值较低。读取测压排水柱的高度就是要确定水柱顶端的位置。所以本方法从水柱顶端的影像作为突破口,利用接

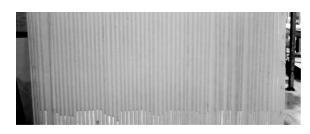


图1 测压排照片示例

触面的亮度差异设计读取方法,从而提取出顶端的位置点,最后读取这些点的坐标,即可以得到水柱的高度。

以1\*、3\*、5\*表孔工况下断面1的测压排为例(见图1)。

坡度(Slope)在数字图像处理技术中是确定每个像元和它的邻近像元之间值的最大的变化率<sup>[6]</sup>。 默认的是计算坡度的变化率(即一个角度的测量)。

坡度 = (高程差/水平距离)×100% 
$$(1)$$

AreMap是一个可用于数据输入、编辑、查询、分析等功能的应用程序,具有基于地图的所有功能,实现如地图制图、地图编辑、地图分析等功能<sup>[7]</sup>。它包含一个复杂的专业制图和编辑系统,利用其中的SLOPE 函数,生成坡度数据,在生成的坡度影像中大部分区域的坡度较大,但是在水柱顶管有块呈带状的坡度较大的斑块,该区域的坡度都在89度以上。

坡向(Aspect)可以理解为水柱与空气接触面的上行方向,与等高线垂直。在 ArcMap 中计算中,可以认为是每个像元与其邻近像元变化率最大的下坡方向<sup>[8]</sup>。在得到的坡向计算结果中,用0到360度的罗盘方向表示,依照顺时针方向。当曲面 z=f(x,y)已知时,通过公式计算给定点的坡向。

图 2 3×3 分析窗口

其中  $f_x$  是东西方向高程变化率,  $f_y$  是南北方向高程变化率。计算中所用到的亮度值情况如图 2 所示。

$$\alpha = 180^{\circ} - \arctan\left(\frac{f_{y}}{f_{x}}\right) + 90^{\circ} \times \left(\frac{f_{x}}{|f_{x}|}\right)$$
 (2)

$$f_x = \left[ \left( e_8 + 2e_1 + e_5 \right) - \left( e_7 + 2e_3 + e_6 \right) \right] / 8 \times \text{cellsize}$$
 (3)

$$f_{y} = \left[ \left( e_{7} + 2e_{4} + e_{8} \right) - \left( e_{6} + 2e_{2} + e_{5} \right) \right] / 8 \times \text{cellsize}$$
 (4)

式中 cellsize 为像元的大小。

利用坡度计算,从而提取水柱顶端的位置, 达到批量数据处理的目的。

**2.2 测试图像前期的预处理** 因为需要确定的是水柱顶端的位置,所以只将包含水柱顶端的位置

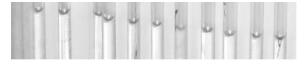


图 3 只包含水柱顶端的照片截图

裁剪下来即可。任意截取该工况下数个水柱顶端照片,如图3所示。

进行坡度计算,计算结果如图4。

从图中可以看出,水柱顶管的坡向为North,坡向主要在0°~22.5°和337.5°~360°之间。

**2.3** 测压排水位位置确定计算过程 结合水柱顶端在坡度图像和坡向图像中的特点,提取水柱顶端的图像。利用栅格计算工具 Raster Calculator<sup>[9]</sup>,设置坡度坡向条件,提取水柱顶端区域,设置的条件语句为:

Result = con(slope > 89&((aspect > 0 & aspect < 20) | (aspect > 350 & aspect < 360)), 1);

其中, con 函数是实现传统的 IF-ELSE 结构的地图代数函数<sup>[10]</sup>。执行上述表达式,并将提取的影像与原测压排图像叠加,得到图 5,从图中可以看出,水柱顶端在图像上呈现块状分布,但是提取结果还是存在一些碎点,表明在原图像上仍有局部点也符合坡度坡向的限定条件。

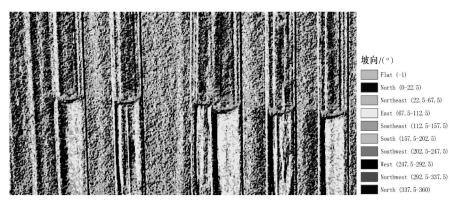


图 4 生成的坡向影像

从图中可以清楚的看到,提取的斑块正好 处于水柱的顶端,说明设置的条件是合理的。

由于提取结果中存在一些碎点,要将其去除,首先需要统计每个有值像元的个数,然后将个数大于某个限定值的区域留下,小于这一



图 5 根据坡度和坡向的限定条件 提取得到的结果与测压排原图叠加

限定值的碎点全部去掉。在ArcMap中,对于同一个区域的一组像元,无论它们的像元值是否相同,RegionGroup函数会给这些像元一个唯一的值,这个值就是这一组像元的个数<sup>[11]</sup>。这里用RegionGroup函数对提取的结果进行处理:

# Mask01 = RegionGroup ([result])

得到各个区域内像元个数后,把小于设定限定值的碎点去除,使用SetNull语句:

Mask02 = SetNull ([mask01].count < 15, 1)

利用 SetNull 函数检验当前像元<sup>[12]</sup>并将这些斑块与原测压排的图像叠加,得到的结果如图 6,图像上的碎点已经去除,只留下水柱顶端的斑块。

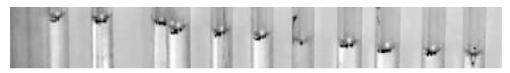


图 6 去除碎点提取得到的结果与测压排原图叠加

提出水柱顶端的斑块后,仍然有一个问题需要解决:在有些水柱顶端有两个甚至多个小的斑块,而每个水柱顶端理想状况下提取的是一个斑块,从而读出一个读数,所以需要将小的斑块合并成一个较大斑块。经过反复验证,发现将每个斑块向外扩张3个像元即可行之有效地将小的斑块连接起来。可以利用Expand函数处理,增加选定区域的大小,通过从周围"吸收"像元,这样与扩展区域相邻的小区域会消失[13]。叠加测压排图像,得到的结果如图7所示。

为了读取水柱高度的数据,需要确定的是水柱顶端一个点的数值,所以需要确定斑块的几何中

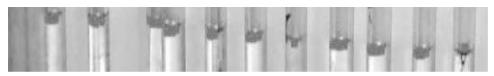


图 7 提取得到的结果与测压排原图叠加

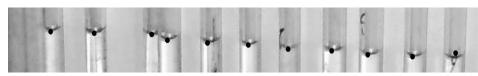


图 8 根据水柱顶端斑块提取出的斑块几何中心的矢量图与测压排原图的叠加

心,作为读数点。由于图7所示斑块为栅格图像格式,不容易提取图像中心,所以需要将其转化为矢量图像,可使用Raster to Pogon工具进行转换即可得到矢量图,接着利用Feature to Point工具,可以直接提取出斑块几何中心的点图层,将其与原测压排叠加,结果如图8所示,从图中可以直观地看出,提取的几何中心点基本都位于水柱顶端的位置。

**2.4** 测压排水位值自动提取 要进行模型的集成,首先要利用 ModelBuilder 为创建模型和复杂的工作流提供一个图形环境<sup>[13-14]</sup>。根据工作流可以将模型可视化。模型存储在 ArcToolbox 中,并可以用不同的参数重新运行。可以对模型进行编辑来改变运行环境,添加或删除工具或数据,或者改变参数或属性。

在自动读数工具提取出水柱顶端的点图层后,需要确定并导出这些点的坐标,其中纵坐标即为测压管的读数。接下来用该工具提取出水柱顶端的点图层后,确定并导出这些点的坐标,其中纵坐标即为测压排的读数。通过Calculate Geometry命令即可自动计算出各个点的纵坐标,并将结果导入excel表格中,根据图片模拟值与真实值的比例关系建立线性方程求得两者的比例大小。设方程为:

$$y = ax + b \tag{5}$$

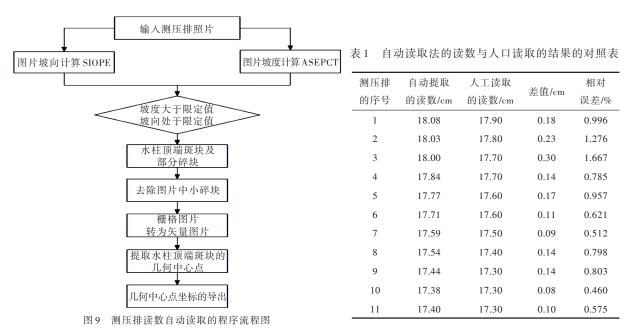
将照片中最右边两个点的实际读数和在 ArcMap 中读数(17.20, 1.17), (17.25, 1.25)代人式(5)中,得到 a=0.63, b=16.46。将输出点在 ArcMap 中读数代人式(5),即得到各个点的实际读数。

以上步骤可以进行批量化处理

总结操作流程如图9所示。

## 3 测压排水位自动提取效果验证

通过上述处理过程,在ArcMap中导出图例中11根水柱的读数,与人工读数可做一对比,如表1所示。



利用水柱顶端两边亮度值的差异设计自动读数的方法,可以提取测压排水柱顶端的点来得到水柱的高度,从直接读数和自动读数的结果对比看来,读数普遍偏大一些,误差来源可能主要与照片的变形以及自动读取水位的位置有关,但相对误差控制在0.460%~1.667%之间。

## 4 结论

该处理方法的特点如下:(1)无需对试验中的单个测压管进行额外的人工处理,如采取添加指示

标志等方法,可直接使用原始实测图像进行数据的读取; (2)因为是利用图像中测压管水柱与空气的接触面进行数据的读取,所以较人为读数而言客观性更强,是切实可行并且高效的; (3)相对于传感器的高成本而言,该方法使用普通的数码照相机即可实现时均压强的数据,试验成本较低,且若进行摄像采样并利用该技术对之进行逐帧处理,还可得到各测点压强的实时变化过程; (4)通过实际应用,发现该方法能够批量处理以节省时间提高准确度,在模型试验中有一定的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 胡鹤鸣, 陈永灿. 旋转水射流冲击压强的实验分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007(1): 42-47.
- [2] 胡鹤鸣.旋转水射流喷嘴内部流动及冲击压强特性研究[D].北京:清华大学,2008.
- [3] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院.金沙江白鹤滩水电站可行研究报告-泄洪消能专题研究报告 [R].2011.
- [4] 水利水电科学研究院,南京水利科学研究院.水工模型试验[M].2版.北京:水利电力出版社,1985.
- [5] 李玉柱, 江春波. 工程流体力学(下册)[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [6] 何玲, 胡文亮. 数字南水北调的虚拟技术应用——以中线工程河北段主干线为例[J]. 地球信息科学, 2004 (2): 72-76.
- [7] 陈燕飞,杜鹏飞.基于 gis 的南宁市建设用地生态适宜性评价[J].清华大学学报(自然科学版),2006(6):801-804.
- [8] 张建春.基于rs和gis的天祝县草原景观空间格局分析与生态环境质量评价[D].兰州:甘肃农业大学, 2009.
- [9] 刘欢,徐中春.基于gis的中国地震灾害人口风险性分析[J].地理科学进展,2012(3):368-374.
- [10] 李宁, 徐凯. 通过 vba 增强 arcmap制图标注功能[J]. 测绘科学, 2009(S1): 130-131.
- [11] 张俊. 基于 geoprocessing 的 arcgis 插件开发研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [12] 陈蕊. Srtm 高程数据空值区域的填补方法及分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [13] 吴建寨,彭涛.山东省建设用地扩展时空动态及驱动力分析[J].中国人口·资源与环境,2011(8): 164-169.
- [14] 廖邦固.基于矢量结构的空间数据转换模型构建与实现[D].上海:华东师范大学,2005.
- [ 15 ] 沈萍月. 基于 arcgis 9 geoprocessing 的处理技术方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

# Application of digital image processing technology in hydraulic model experiment

LIU Yu1, ZHOU Qi2, YU Wangyang2

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Time-average pressure is a very important data in hydraulic model test research. The piezometer tubes is the most direct and economical measuring tool in the hydraulic model test. Combined with the comparison-study on the flood discharge and energy dissipation of Baihetan Hydropower Station, a new method by the digital image processing technology, which is based on measuring system of piezometer tubes, has been developed to automatically obtain data through differences of gray value, by the tools module of the integrated software platform to achieve the bulk of the automatic processing of photographs, so as to achieve the purpose of batch data processing. After the detection of the application example, we can find that the method not only solves the problem of the traditional methods of artificial reading a heavy workload, but also has feasibility and efficiency.

**Keywords:** hydraulic model test; piezometric discharge water level; digital image processing; time average pressure

(责任编辑: 祁 伟)