

# 道路积水深度测量研究综述

徐志康 冯 径 常昊天

(解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101)

**摘要:** 为了满足实时监测城市道路积水深度的需要,采用合适的测量方法对积水深度进行快速、准确地测量十分重要。不同的测量方法直接影响到水深测量的准确性,对现有道路积水深度的测量方法进行了归纳介绍,可分为接触式测量、非接触式测量和图像式测量。接触式和非接触式测量主要运用了传感器技术,将水深转换成电信号、非电信号来测量水深;图像式测量则运用图像处理技术来提取图像中的水位线间接测量水深,并逐渐成为研究热点。通过分析、对比各方法的优缺点,发现各测量技术在不同环境下具有不同的适用性,而图像式测量能够较好适应不同的环境。最后对道路积水深度测量技术的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 道路积水深度; 传感器技术; 图像处理; 实时监测

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Research survey of road-water depth measurements

Xu Zhikang Feng Jing Chang Haotian

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of real-time monitoring of road-water depth, it is very important to use the appropriate measurement method to measure the depth of road-water quickly and accurately. Different measurement methods directly affect the accuracy of water depth measurement and some measurement methods for the road-water depth are summarized, which can be divided into contact measurement, non-contact measurement and image measurement. The contact and non-contact measurements mainly use sensor technology to convert water depth into electrical signals, non-electrical signals to measure the water depth. Image measurement uses image processing technology to extract the water level in the image to measure the water depth indirectly, and gradually become a research hotspot. By analyzing and comparing the advantages and disadvantages of each method, it is found that each measurement technology has different applicability in different environments, and the image measurement can better adapt to different environments. Finally, the development trend of road-water depth measurement technology is prospected.

**Keywords:** road-water depth; sensor technology; image processing; real-time monitoring

## 0 引言

道路积水不仅会造成交通中断,甚至会危害到人身财产安全,因此城市道路积水监测系统的建设需求也日益增加<sup>[1]</sup>。随着信息技术的发展,道路排水系统自动化程度逐渐提高,从20世纪80年代开始,国内不断探索新的技术手段来建立道路积水监控系统,但总体上地区发展不平衡,信息化程度也相对较低<sup>[2]</sup>。目前国内许多城市针对内涝、道路积水等采取了一系列综合措施来打造海绵城市、海绵园区,例如建立道路积水监测系统,对下穿式立交桥、低洼道路和隧道等经常积水区域进行水位监测,为城市防汛、交通疏通以及居民生活提供保障<sup>[3]</sup>。

道路积水监测系统可分为数据采集终端、数据传输设备、控制中心以及用户终端4部分<sup>[4-5]</sup>。数据采集终端用来测量道路积水水深,按照测量方式可分为接触式、非接触式以及图像式3类。接触式测量有水尺测量、接触式传感器测量等常规测量方法,非接触式测量有红外测量、超声波测量等<sup>[6]</sup>,图像式测量则采用不同的图像处理方法来提高测量精度。

## 1 接触式测量

随着现代电子技术、传感器技术、通信技术和计算机技术的高速发展,各式各样的传感器被应用于积水深度测量,

实现了水位的自动化和实时测量,在河流、明渠、水库的水位测量中均有广泛应用。目前接触式水位传感器主要有浮子式、压力式、电极感应式、电容式等<sup>[7]</sup>。

1.1 水尺测量

水尺测量是一种常规测量水深的办法,在需要测量水深的区域放置水尺,例如内陆河流以及城市中的下穿立交、低洼道路和隧道等地。水尺可以直接显示道路积水深度,然而该方法的实时性和自动化程度较低,需要人工记录和汇报,在一些特殊场景下实现难度较大。就道路积水测量来讲,水尺测量占有较大比例,通常在经常发生积水的区域安置水尺或者在墙壁、石柱上绘制水尺刻度以提供水深数据。

1.2 电极感应式水位传感器

电极感应式水位传感器利用水的导电性来测量水位高度,基本原理是将一根公用电极插入水中,然后将活动电极用来感应水位,当水位变化时,即可接通(或断开)正负极形成回路,输出电信号。图 1 是目前常用的电子水尺示意图,属于电极感应式水位传感器,因其具有测量精度高、安装简易、环境影响较小等优点而被广泛使用。电子水尺的常见尺寸有 40、80、120、160、200、240 mm,实际应用中可利用连接件将不同尺寸的电子水尺进行组合,以扩展水位的测量范围,其部分性能参数如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

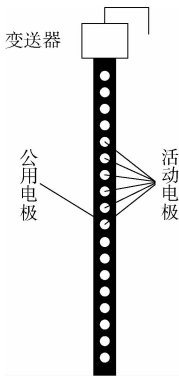


图 1 电子水尺示意图

表 1 电子水尺部分性能参数

性能指标	工作电压	测量范围	输出电压	测量精度
参数	12 V ± 15%	0~10 m	1~5 V	10 mm

1.3 压力式水位传感器

除电子水尺外,压力式水位传感器也能较为精确地测量积水深度,其原理是传感器测量到的压力大小与水位高度成正比而与接触面积无关,故压力传感器在不同的水深能够感应到不同的压力,并转化成相应的电信号进行输出。在实际的应用当中,压力式水位传感器易受到温度影响,同样也容易受到污染造成损坏,后续的维护、更换工作相对繁重。

夏志川等人<sup>[9]</sup>设计的城市道路积水多点监测及预警系

统采用松下 D3A 压力传感器作为数据采集终端,其性能指标如表 2 所示。

表 2 松下 D3A 压力传感器部分性能参数

性能指标	工作电压	测量范围	输出电压	测量精度
参数	4.2~6.2 V	0~10 m	0.23~4.9 V	1 mm

2 非接触式测量

2.1 红外测深

王艳斌等人<sup>[10]</sup>使用多波段红外遥测方式实现了路面干、潮、积水 3 种状态的监测以及路表水膜厚度的测量。由于红外光照射在水面上会发生向后散射等现象,通过分析接收光与发射光的光强关系可实现水深测量。如图 2 所示,为提高测量精度,采用 3 种不同波长作为红外探测的光源,构成阵列式红外光源,以固定角度安装在被测区域的斜上方,并在路面无水时进行干标定,获得比对信号  $D$ 。在需测量积水深度时,发射红外光束,进行测量,获得光信号  $S$ 。

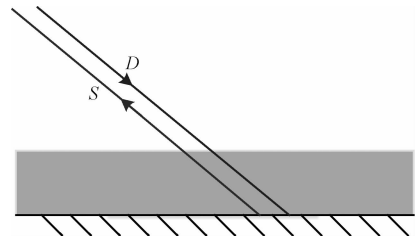


图 2 红外式测深示意图

该模型如式(1)所示<sup>[10]</sup>。

$$\ln(D/S) = k\epsilon d \tag{1}$$

式中: $D$  为无水时的比对信号,  $S$  为有水膜时的光信号,  $d$  为覆盖物的厚度,  $k$  为受路面材质等条件影响的常数,  $\epsilon$  为光被物质吸收的比例,与入射光波长和吸收物质自身性质有关。

根据 3 种不同波段下的数据信号  $S$  和比对信号  $D$  可求得道路积水:

$$d = \frac{1}{3k_1\epsilon_1} \ln\left(\frac{D_1}{S_1}\right) + \frac{1}{3k_2\epsilon_2} \ln\left(\frac{D_2}{S_2}\right) + \frac{1}{3k_3\epsilon_3} \ln\left(\frac{D_3}{S_3}\right) \tag{2}$$

经整理之后转换为:

$$d = \alpha_1 \ln\left(\frac{D_1}{S_1}\right) + \alpha_2 \ln\left(\frac{D_2}{S_2}\right) + \alpha_3 \ln\left(\frac{D_3}{S_3}\right) \tag{3}$$

通过足够多的测量数据,求出系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ,并由此测得积水厚度。该实验中采用的方法是 2 mm 厚度水蒸发实验,采用高精度水位传感器的测量结果作为标准数据,由此验证红外法测量结果的准确性。红外测深方法在实际应用中具有一定局限性,成本相对较高。

2.2 超声波测深

声波在声阻抗有差别的介质界面或遇到障碍物会产生反射,声阻抗差别越大,反射越强<sup>[11]</sup>。对于超声波而言,水

和空气交界面可视作全反射界面,部分声能遇到气液界面将会反射至声源。超声波这一特性可用于道路积水深度的非接触式测量<sup>[12]</sup>。

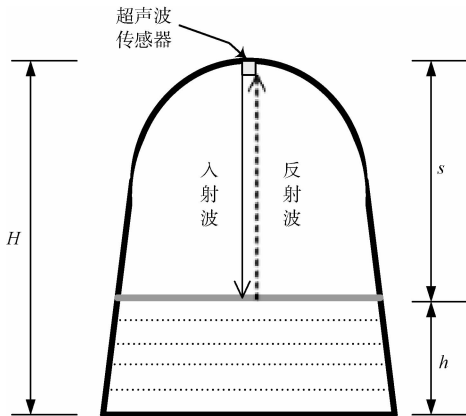


图3 超声波测深示意图

超声波测距的基本原理如图3所示<sup>[13]</sup>,将仪器安装在被测区域上方,由换能器向被测水面垂直发射超声波脉冲,声波遇到气-液面产生漫反射形成回波,并由接收器接收,同时传感器中的计时模块计算其传输时间。根据接收到反射波的时间 $t$ 及设备高度 $H$ ,由式(4)可求得积水水深 $h$ 。

$$\begin{cases} s = \frac{1}{2}ct \\ h = H - s \end{cases} \quad (4)$$

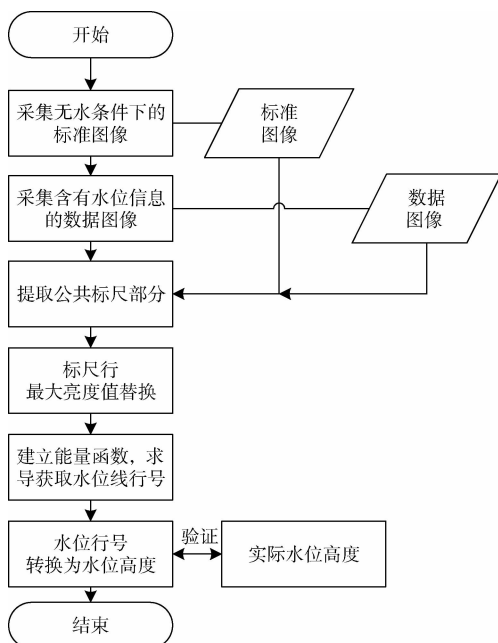


图4 基于像元亮度的水位提取模型流程

超声波传感器虽然能够实现道路积水的自动化测量,但是声速受到温度、湿度、大气压力、风速等因素影响,造成测量误差,在实际应用中应当采取补偿措施校正声速<sup>[14]</sup>。

### 3 图像式测量

随着信息技术的高速发展,图像处理技术逐渐应用到测量领域,例如精密仪器自动读数<sup>[15]</sup>,河流、明渠的水位测量<sup>[16]</sup>等。现阶段水位信息的自动提取方法大多基于水尺图像提取水位线,并结合图像中水尺刻度来实现水深测量。该方法需要在测量地点安置水位标尺和视频图像采集装置,成本相对高精度的传感器较低。

根据在图像处理中提取水位线的评判标准不同,图像式测量可分为基于像元亮度、基于边缘检测和基于 HSV 颜色空间 3 种水位提取方法。

#### 3.1 基于像元亮度的水位提取方法

由于图像中水位上、下两部分存在较大的亮度差异,基于像元亮度的水位提取方法就是以此作为评判标准来确定水位线位置。例如石玉立等人<sup>[17]</sup>构建了一个基于视频图像的 IDL 水位监测模型,以此为原理从图像中提取水位线,并进一步确定水深,其流程如图4所示。

该方法具体步骤如下<sup>[17]</sup>:

1) 将无水时的水尺图像作为标准图像,将含有水位信息的水尺图像作为数据图像。通过图像配准对照数据图像与标准图像,从中提取公共标尺部分。

2) 对比数据图像(图5(a))和标准图像(图5(b)),结果如图5所示。数据图像中像元亮度值在水位线处发生突变,由此可将像元亮度值作为提取水位线的评判标准,为了增大水面上下的亮度差别,将图像行最大亮度值代替每一行的像元值。

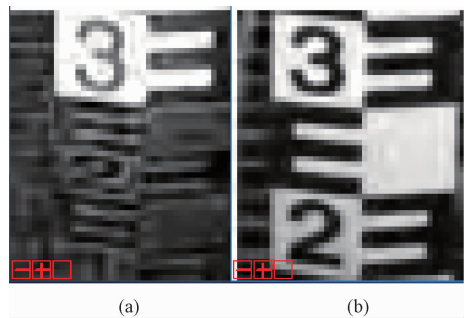


图5 水位线亮度突变示意图

3) 建立统计能量函数模型,假定在一幅含有 $n$ 行像素的数据图像中,第 $i$ 行的亮度和为 $I_i$ ,构建能量函数如下<sup>[17]</sup>:

$$E = \sum_{i=1}^n I_i \quad (5)$$

4) 对能量函数 $E$ 求一阶导数,则其发生突变的行数即为水位线,该位置对应的行号记为 $r$ 。

5) 在前期图像预处理中进行图像配准,可将 $r$ 行直接对应到标准图像中,实现水位线的提取。假定在标准图像中已知水尺高 $h$ 处行号为 $n$ 行,则水深为:

$$H = \frac{h}{n}r \quad (6)$$

上述模型的水位计算结果与实际水位之间的相关性能够达到 0.83, 均方差为 1.5 cm, 由此可知该模型能够较为准确地测量水深<sup>[17]</sup>。但该方法将像元亮度作为评判标准, 当数据图像中的水位上下像元灰度值差距较小时, 难以确定水位线位置, 测量误差相对较大, 在实际应用中具有一定的局限性。

### 3.2 基于边缘检测的水位提取方法

在图像中水体部分的灰度值基本一致, 水面区域的纹理性不强, 且物体的纹理性基本不变<sup>[18]</sup>, 因此在水尺与水体交界处存在较强的边缘信息, 可采用边缘检测方法来提取水位线, 而边缘检测算子能够较好实现边缘检测<sup>[19]</sup>。林瑞凤等人<sup>[20]</sup>采用一阶导数梯度边缘检测算子, 陈翠等人<sup>[21]</sup>采用 Canny 边缘检测算子, 兰华勇等人<sup>[22]</sup>采用 Sobel 算子来提取水位线, 陈金水<sup>[23]</sup>采用 Hough 变换识别刻度线, 结合水位线来测量水深, 取得较好效果。

基于边缘检测的水位提取模型基本流程如下:

1) 将摄像机获取到的视频图像采用边缘算子进行边缘检测。

2) 在边缘检测结果的基础上结合已有经验, 滤除图像中无用边缘信息。例如, 由于水位线为长直线, 边缘信息中平行于水位线方向的为有用信息, 其他方向上为无用信息。

3) 以边缘信息的数量或者强度作为确定水位线位置的评判标准, 进而提取水位线。

4) 将确定的水位线位置对应到水尺刻度, 计算出实际水深。

在此基础上, 梁波<sup>[24]</sup>选用已知高度的参照物代替具有刻度值的水尺, 将积水的水位线位置提取后, 根据水位线与参照物的位置关系确定水深; 李乔<sup>[25]</sup>将边缘检测方法应用到移动终端, 并通过人机交互的方式减少了数据处理流程, 实现了基于移动终端的水深测量。

### 3.3 基于 HSV 颜色空间的水位提取方法

基于像元亮度及边缘检测的水位提取方法, 在水质较为浑浊的情况下实现效果较好。这是因为这两种方法都是利用水位线上线下的灰度差异来实现水位提取的, 而在水质较为清澈的情况下, 容易出现水尺倒影, 两者的处理效果不理想。针对水质较为清澈的情况下, 王莹<sup>[26]</sup>基于 HSV 颜色空间构建水位提取模型来获得水位。高晓亮等人<sup>[27]</sup>将

RGB 映射到 HSV 颜色空间, 利用图像色调分量不受光照影响的特性, 建立统计模型以获得水位深度。该模型实现流程如下<sup>[27]</sup>:

1) 将视频图像由 RGB 空间映射到 HSV 颜色空间, H 代表色调分量, 对同一物体在不同的光照下来说, 其色度反映该物体颜色接近什么样的光谱波长, 基本保持不变。

2) 根据图像的色调分量 H 建立色调模型:

$$I_H(x, y), (x, y) \in R_{all} \quad (7)$$

式中:  $R_{all}$  代表整个图像区域。采用灰度直方图的阈值分割算法, 快速分割出标尺区域  $R_r$ , 减少复杂背景所引入的无效数据, 降低图像处理算法的复杂度。根据标尺区域  $R_r$ , 重新定义色调模型:

$$I_h(x, y) = I_H(x, y), (x, y) \in R_r \quad (8)$$

3) 在标尺区域  $R_r$  上对色调模型  $I_h(x, y)$  进行平滑和降噪处理, 尽可能减弱由于图像模糊、噪声影响水位提取效果。

4) 设计能量函数 E, 通过最小化能量函数计算水面的位置。通过最小化能量函数来解决实际问题的方法较为普遍, 尤其在图像分割领域应用广泛。步骤 2) 中已确定标尺区域  $R_r = \{(x, y) | x \in [0, m], y \in [0, n]\}$ , 据此定义统计函数:

$$h(y) = \int_0^m I_z(x, y) dx, y \in [0, n] \quad (9)$$

在标尺区域  $R_r$  中, 每一行  $y$  均对应一个  $h(y)$ , 构造能量函数:

$$E(y) = -|h(y)|, y \in [0, n] \quad (10)$$

由于水位线以上的标尺与水中倒影的  $h(y)$  相差较大, 即  $h(y)$  在水面发生了较大的跳跃, 故当  $E(y)$  最小化时, 所求得  $y$  即为水面位置。

## 4 积水深度测量方式比较

测量水深的方法众多, 然而每一种测量方法都有自己的优缺点, 在不同的需求下各种方法的适用程度也不尽相同。就道路积水水深测量的应用背景来讲, 测量方法的可实施性、算法复杂度(数据处理时间)、设备的环境适应性、测量精度、实时监测、人工强度等指标项相对来说比较重要。表 3 是对上述的水尺测量、传感器测量、红外测深、超声波测深以及视频图像监测 5 种测量方法的各指标项进行了比较, 将指标等级设为高、中、低(弱), 其中人工强度和算法复杂度则是越低代表着其适用程度越高。

表 3 测量方法的对比指标

对比指标	环境适应性	可实施性	人工强度	算法复杂度	测量精度	实时监测
水尺测量	中	高	高	低	中	否
接触式传感器测量	中	中	中	中	中	是
红外测深	弱	中	中	中	高	是
超声波测深	弱	中	中	中	高	是
视频图像监测	强	高	低	高	中	是

环境适应性主要是指数据采集设备(传感器、摄像机等)对水深的测量效果受温度、湿度等环境因素影响的程度;可实施性是指该测量方法在实际的工程建设中能否按照计划建设完成;人工强度是指该测量方法需要人工实施测量的程度,例如采用水尺测量的方法,该项指标较高;算法复杂度则是该方法处理数据的算法复杂程度,同时也代表着由数据采集至水位提取完毕运行所需时间,算法复杂程度越高则其提取水位所需时间越长;测量精度体现的是该方法的测量误差,误差 1 mm 视为“高”,1 cm 视为“中”,1 dm 视为“低”;实时监测指标即是指该方法能否实现积水深度的实时测量。

将表 3 中的 6 个指标按照高、中、低分为 3、2、1(人工强度和算法复杂度按照 1、2、3 分级),等级越高则其适合道路积水深度测量的适应性越强,如图 6 所示。

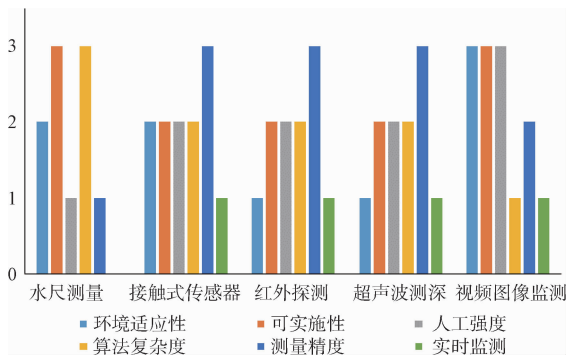


图 6 各测量方法指标对比

从图 6 中可以发现,采用传感器和视频监测的方法均能实现实时水位监测。接触式传感器的主要缺点是容易受到积水、泥沙污染,需要定期维护、更换,而非接触式传感器的测量结果容易受温度等环境因素影响,造成测量误差增大。视频图像监测则能够较好地适应环境,但是其算法复杂度可能会影响水位数据的提取速度,需要通过改进提取算法来提高运算速度。

目前道路积水深度测量主要采用的是接触式测量方法,而视频监测方法则是未来道路积水深度测量采用的测量方式。在不同的测量环境下各方法的适用性不同,而图像式测量可以通过建立水位提取模型以适应不同的环境,同时还能够在降低人工强度、建设成本的前提下满足自动化测量和实时监测的要求。

## 5 结 论

传统的道路积水测量主要采用水尺直接测量和传感器测量,水尺测量耗费人工较大,而采用接触式传感器虽然能够实现自动化测量,但容易受到积水、泥沙污染,造成损坏;非接触式传感器虽然测量精度较高,但是其受温度等环境因素影响较大,而且其成本相对较高。采用视频图像实现水位实时监测已经成功在河流、明渠和水库水深测

量中实现,下一步的工作应当设计更加适合道路积水这一条件下的水位提取算法,提高积水水深测量精度,同时考虑结合移动终端和 GIS 技术来实现水位提取及信息发布。

## 参考文献

- [1] 孙永尚,刘扬,赵军合,等.北京市内涝积水监测预警系统设计与实现[J].地理空间信息,2015,13(4):117-119.
- [2] 潘崇伦.上海市下立交积水自动监测系统设计与实现[J].水利信息化,2010(3):42-44.
- [3] 王辉,庄敏捷,刘波,等.上海下立交积水自动监测系统优化设计[J].给水排水,2011,37(12):117-118.
- [4] 黄志武,王霞霞.基于传感网络的公路积水深度测量系统的设计[J].计算机测量与控制,2013,21(2):352-354.
- [5] 李振.城市道路积水监控系统设计与实现[D].成都:电子科技大学,2013.
- [6] 张显.基于图像处理的视频液位检测系统的研究[D].长沙:湖南大学,2010.
- [7] 张阳.基于计算机视觉的河流水位测量系统设计[D].太原:太原理工大学,2014.
- [8] 徐海军,刘林海.电子水尺在城市道路积水监测系统中的应用[J].水利信息化,2010(3):45-47.
- [9] 夏志川,钟小建,阮飞,等.城市道路积水多点监测及预警系统设计[J].电子测试,2013(5):56-57.
- [10] 王艳斌,李秀红,余国河,等.红外遥测式路面状况传感器的水厚度测量[J].电子产品世界,2014(4):26-27.
- [11] 惠延波,李永超,王莉,等.超声波近距报警装置设计[J].电子测量技术,2016,39(5):120-122.
- [12] 李戈,孟祥杰,王晓华,等.国内超声波测距研究应用现状[J].测绘科学,2011,36(4):60-62.
- [13] 王贵恩,林泽钊,林育珊,等.非接触式城市窨井探测预警系统设计[J].电子测量技术,2017,40(1):110-113.
- [14] 陈春梅,李博涵.基于超声波的道路积水监测与移动终端报警系统[J].信息通信,2015(11):74-75.
- [15] 张军国,石睿,陈劭.基于 ICM 的精密指针式仪表自动读数方法[J].仪器仪表学报,2016,37(12):2866-2872.
- [16] 陈金丽.基于视频图像的液位检测与跟踪系统分析与设计[D].长沙:湖南大学,2009.
- [17] 石玉立,夏振,王林.基于 IDL 的视频图像水位检测新算法[J].科学技术与工程,2014,14(29):114-116.
- [18] 周美丽,白宗文.基于形状特征的图像检索系统的设计[J].国外电子测量技术,2015,34(6):82-84.
- [19] 王江明,余焯,金强,等.多梯度融合的 RGBD 图像边缘检测[J].电子测量与仪器学报,2017,31(3):

- 436-442.
- [20] 林瑞凤, 徐海. 基于图像传感器的明渠水位自动测量方法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(8):53-55.
- [21] 陈翠, 刘正伟, 陈晓生, 等. 基于图像处理的水位信息自动提取技术[J]. 水利信息化, 2016(1):48-55.
- [22] 兰华勇, 严华. 基于图像识别技术的水尺刻度提取方法研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(3):28-30.
- [23] 陈金水. 基于视频图像识别的水位数据获取方法[J]. 水利信息化, 2013(1):48-51.
- [24] 梁波. 基于数字图像的液位远程监测系统[D]. 太原:太原理工大学, 2013.
- [25] 李乔. 基于移动终端的水位监测与车牌定位算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [26] 王莹. 基于图像处理的水位监测系统的研究与实

现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.

- [27] 高晓亮, 王志良, 王馨, 刘冀伟. 基于 HSV 空间的视频实时水位检测算法[J]. 郑州大学学报:理学版, 2010, 42(3):75-79.

## 作者简介

**徐志康**, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为信息系统与集成。

E-mail: xzkvin@126.com

**冯径**, 1962 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络、分布式系统、无线传感器网络等。

**常昊天**, 1990 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为智能无线传感器网络。