

文章编号: 1672-2892(2011)05-0646-05

## 基于空气、冰与水物理特性的冰情检测系统

秦建敏<sup>1</sup>, 刘笑达<sup>1</sup>, 李学春<sup>1,2</sup>

(1.太原理工大学 测控技术研究所, 山西 太原 030024; 2.黄河水利委员会 宁蒙水文水资源局, 内蒙古自治区 包头 014030)

**摘要:** 为了实现一种新的定点冰水情自动检测方法, 利用空气、冰与水的电阻及温度特性差异规律, 通过分层检测获取电阻与温度数据来实现对冰层厚度、冰层内部温度梯度与冰下水位的自动连续检测。在此基础上研制了电阻-温度式冰水情传感器与冰情连续自动数据检测系统, 并在南极科考、黄河冰情预报等科研和水电工程中进行了冰情检测现场应用。通过工程应用实践证明, 该方法对冰水情进行连续自动检测是完全可行的。

**关键词:** 冰情检测系统; 温度梯度; 冰情预报

**中图分类号:** TN911.72; TP274<sup>+.5</sup>

**文献标识码:** A

## Ice regime detection system based on the physical properties of air, ice and water

QIN Jian-min<sup>1</sup>, LIU Xiao-da<sup>1</sup>, LI Xue-chun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Measuring & Controlling, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;

2. Yellow River Conservancy Commission, Bureau of hydrology and water resources of Ningmeng, Baotou Neimenggu 014030, China)

**Abstract:** In order to realize a new fixed ice regime detection method, according to the characteristic difference rule of resistance and temperature of air, ice and water, through stratified detection, resistance and temperature data are obtained to determine the ice thickness, ice internal temperature gradient and water level under the ice. On this basis, a kind of resistance-temperature ice regime sensor and an automatic detection system are developed, which are applied to the Antarctic expedition and the ice forecast research of the Yellow River. The application results indicate that the proposed system is completely feasible in ice regime automatic detection.

**Key words:** ice regime detection system; temperature gradient; ice forecast

近几年, 全球气候异常已成为 21 世纪人类生存面临的巨大威胁之一。为了应对全球气候变暖对人类生存环境的挑战与影响, 从 20 世纪 90 年代开始, 我国将被科学家称为地球“三极”的南极、北极与青藏高原列为重要科考对象。其中, 反映环境、气候变化最直观而有效的是冰川、海冰厚度的变化。但是, 对冰川、海冰厚度现场连续自动测量仍未得到很好解决<sup>[1]</sup>。虽然我国和一些发达国家已通过卫星或雷达等技术对海冰的大面积变化进行监测, 但由于特殊的物理条件及恶劣的工作环境的影响, 大多数情况下, 这些方法尚无法满足对冰层生消变化全过程的自动化检测的需求, 因此对冰情定点连续自动检测新方法 & 检测设备的研制成为南北极科考、水电工程、航运的安全运行、气象与环境监测、国家防灾减灾与黄河冰凌预报等领域的前沿课题和急需技术。作者与课题组同志经过近十年的研究、探索, 提出了一种新的冰情检测方法, 并在实际工程中获得应用。

### 1 基于空气、冰与水的物理特性差异实现冰水情定点连续检测

#### 1.1 冰水情定点连续检测方法

基于空气、冰与水的物理特性差异实现冰水情定点连续检测的方法是作者针对冰情检测中最基本参数—冰层厚度检测中存在的技术难题提出的一种新的冰情检测方法<sup>[2]</sup>。该检测方法基本思路是: 从物体导电特性出发, 认为自然水(包含有导电杂质的河、湖、海、自来水等)是良导电物体, 空气是绝缘体, 而在 0℃~40℃范围内, 则

收稿日期: 2010-11-04; 修回日期: 2010-12-16

基金项目: 国家自然科学基金中-俄(NSFC-RFBR)合作项目(60811120556); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20091402110004)

把冰看作具有弱导电物理特征(而不是传统冰检测理论中把冰作为绝缘体处理)的半导体。基于这一认识,在对河冰或海冰生、消变化检测过程中,将检测范围的垂直立体空间划分为空气、冰和冰下水这 3 个具有不同电物理特性的区域层。由于这 3 个区间的电阻、电容、温度等物理参数具有明显的数值差异,可以通过一放置在被测空间的专用检测电路,将被测空间垂直切割成  $N$  个(个数由检测精确度决定)水平的物理参数检测层回路,依次对被测层介质的相关物理参数进行自动测量,由获得的检测数据识别确定被测层的物理属性,进而判断出冰层的上下界面,得到冰层厚度及冰下水位的数值<sup>[2-6]</sup>。新的检测方法与国内外目前采用的各种冰情检测或预测方法相比,最大优点是它可以连续、全面地掌握冰层内部冰物理状态变化的全过程信息。图 1 是这个检测方法的基本原理,在单片机程序控制下可以分时实现对检测空间不同分割水平截面物理参数的采集、判断。其中,DS18B20 是测量温度的半导体集成温度传感器,它可以在单片机程序控制下通过单总线实现对被测点环境温度的数字化实时检测,而左边的触点对可以对被测水平面的等效电阻或等效电容数值进行检测。

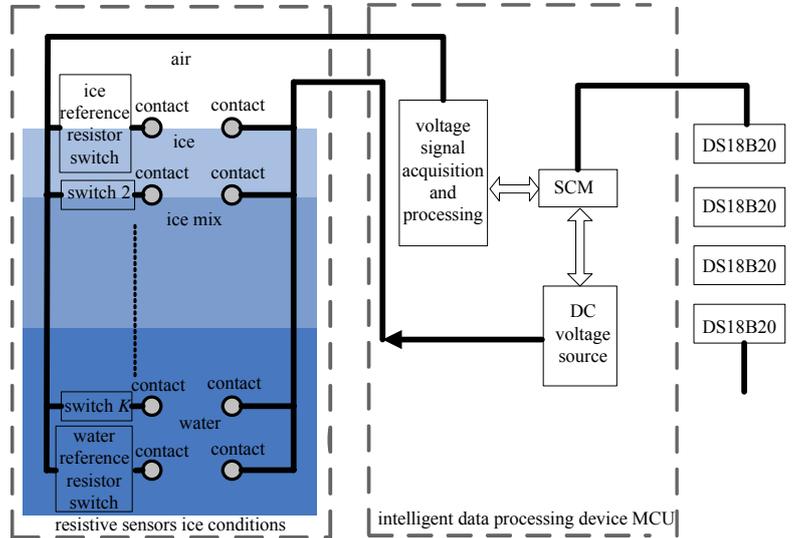


Fig. 1 Fixed hydrological continuous detection principle based on the differences of physical properties of air, ice and water

图 1 基于空气、冰与水的物理特性差异实现冰水情定点连续检测原理图

### 1.2 冬季结冰条件下空气、冰与水的电阻与温度数值分布规律

经过大量的实验室试验分析和河道现场观测验证,基本掌握了空气、冰与水的电阻值取值范围和冰层内部温度梯度变化规律<sup>[7-8]</sup>。在此基础上,通过图 1 所示电路,可以根据采集到的物理参数判断出被测空间位置处于何种物理状态(空气、结冰还是液态水)。

#### 1.2.1 空气、冰与水的等效电阻取值规律

电阻是自然水具有的基本物理特性参数。自然水结冰后的等效电阻值由检测触点截面大小、两触点距离、冰内所含杂质与温度等多项因素共同决定。按照前述检测原理,设计了图 1 的电阻、温度梯度数据同步自动采集试验装置。装置中,各检测触点垂直间距 1 cm,总量程 16 cm,通过单片机程序控制可以分时接通各开关电路,使每 1 对检测触点中间被测介质的等效电阻与单片智能数据处理器内部的电压信号采集处理电路(固定电阻  $R_0$ )构成见图 2 的电阻分压检测电路。在外施直流电压  $V_{CC}$ ,  $R_0$  值给定条件下,根据检测获得的分压值并通过式(1)和式(2)计算出被测介质相应的等效电阻值  $R_x$ ,还可在单片机内嵌程序控制下,通过总线同步检测相应高度位置被测介质的温度值。实验中选取自来水,对空气、冰与水的电阻值随温度变化的特性进行了大量的实验室观测试验。

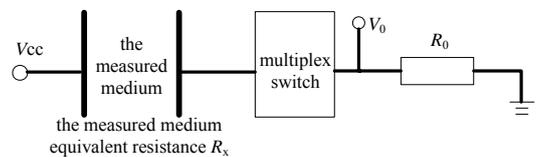


Fig. 2 Diagram of equivalent resistance detection circuit

图 2 等效电阻检测电路原理图

$$V_0 = V_{CC} R_0 / (R_0 + R_x) \tag{1}$$

$$R_x = (V_{CC} - V_0) / (V_0 / R_0) = R_0 [(V_{CC} / V_0) - 1] \tag{2}$$

将数据采集装置放置于内部充有自来水的塑料容器内,将其放入冰柜逐渐降温直至结冰。其中:触点 1~8 浸泡在水内,触点 9~16 暴露于空气中,测试条件选定为  $V_{CC}=3.3\text{ V}$ ,  $R_0=10\text{ M}\Omega$ ,在实验室反复对结冰和消融过程中  $R_0$  分压值和容器水及冰柜内温度梯度同步进行连续自动数据采集,并将采集获得的各检测触点对应的分压记录值通过式(2)转换为相应的等效电阻值,通过对大量实验数据的分析可以获知空气、冰与水的等效电阻值数据取值范围为:在室温~ $-40\text{ }^\circ\text{C}$  范围内,自然水(雨/河/湖/海水等)电阻值在几千欧姆~几兆欧姆范围;冰具有弱导电性,电阻值在几兆欧姆~几十兆欧姆范围;空气电阻值大于几百兆欧姆,三者具有明显的数值差异;对于水和冰来说,在相同测试条件下,随着温度的降低,等效电阻值会下降。

### 1.2.2 冰层内部温度梯度分布规律

冰层内部温度梯度的分布规律为： $T_{\text{冰水混合液体}} \approx 0^\circ\text{C}$ ， $T_{\text{冰层内部}} < 0^\circ\text{C}$ ， $T_{\text{冰层下河水}} \geq 0^\circ\text{C}$ ；冰层内部温度在接近检测空间上表面部分受空气气温影响较大，而接近冰层下界面(下界面为冰下液态水)温度则会由低于零度数值逐渐上升为  $0^\circ\text{C}$ 。

上述等效电阻值取值与冰层内部温度梯度的分布规律通过在野外实际河道的多次连续观测试验得到了证实，这个规律的掌握，使得实际利用空气、冰与水的电阻-温度特性差异实现冰水情定点连续检测的方法可以实现。

## 2 基于空气、冰与水的电阻-温度特性差异实现定点冰情连续在线测量

在理论分析试验的基础上，基于图 1 所示电阻、温度梯度数据同步自动采集原理，研制了适用于河道冰情连续自动检测的电阻-温度式(R-T)冰水情传感器与定点冰情连续自动数据检测系统。

### 2.1 R-T 冰水情传感器

图 3 为 R-T 冰水情传感器电路系统。图 2 中各检测开关通过外接单片机程序控制可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device, CPLD)加以实现。在不影响测量精确度的前提下，将若干组开关的一个触点短接，形成检测回线触点，简化了传感器结构<sup>[7]</sup>。

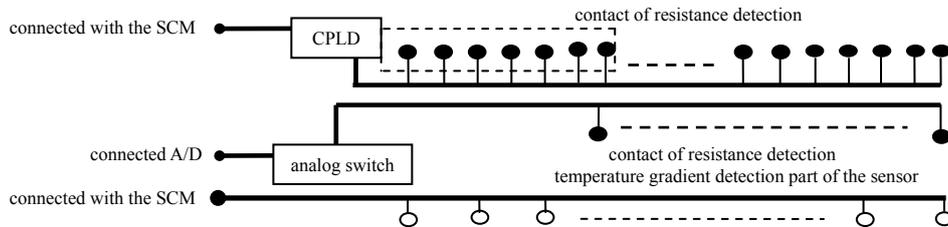


Fig.3 Architecture of R-T hydrological sensor circuit  
图 3 R-T 冰水情传感器电路结构图

### 2.2 基于 R-T 冰水情传感器的定点冰情连续自动数据检测系统

为了实现对河道冰水情数据的实时采集和通信，以 MSP430 单片机作处理器，R-T 冰水情传感器作为冰水情数据采集传感器，设计了定点冰水情连续自动数据检测系统，其系统结构见图 4。

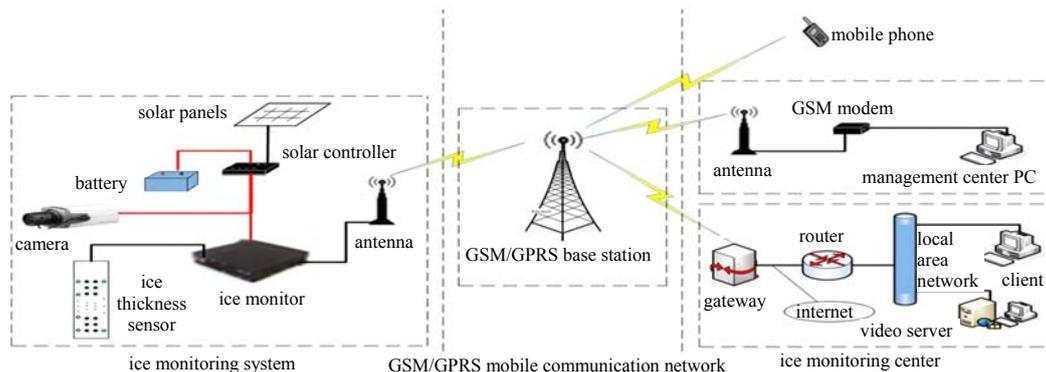


Fig.4 Hydrological automatic detection system for river  
图 4 河道冰水情连续自动数据检测系统

根据监测系统大多在无供电条件、偏僻野外环境下工作的特点，系统采用太阳能供电系统供电；通过安装在现场的 R-T 式冰水情传感器和摄像头采集冰、水情数据(包括电阻、温度、图像)，经冰情监测仪实时处理后通过 GSM 短信(电阻、温度与控制命令信息)与 GPRS 数据传输网络(现场图像压缩信号)传送到信息处理终端(PC 管理微机或手机)进行后期处理，由于信号传输是借助于移动通信平台通过无线传输实现的，所以定点冰情连续自动数据检测系统具有前期投资低、检测地点受自然条件限制少、运行费用低等优点<sup>[9-10]</sup>。

## 3 冰情自动检测系统在实际冰情检测工程中的应用

从 2004 年开始，分别在南极中山站海域、黄河内蒙托克托县头道拐河道、四川金沙江巴塘县党恩电站坝址、

内蒙古额尔古纳河奇乾水文站、山西省汾河、滹沱河河道等对新研制的 R-T 冰水情传感器与定点冰情连续自动数据检测系统及基于空气、冰与水的 R-T 特性差异进行冰水情定点连续自动检测的工程试验，取得大量的实测数据，也验证了前面所述原理是可行的。较为典型的应用如下。

南极海冰观测试验<sup>[2]</sup>：从 2004 年 10 月到 2009 年，项目组先后为中国第 21,22,24 次南极科学考察提供了 14 套电阻式冰层厚度检测装置用于南极中山站海冰观测项目。图 5 是 2005 年 1 月在南极中山站利用电阻式冰层厚度传感器现场试验检测获得的大量实测数据典型曲线。该试验中  $V_{CC}=5\text{ V}$ ,  $R_0=10\text{ M}\Omega$ ，图中横坐标为传感器垂直于冰面下距离值，纵坐标为冰厚测报仪检测获得的反映各检测垂直平面分压电阻(图 2 中  $R_0$ )两端得到的采样电压值(由式(1)可知，在  $V_{CC}$  和  $R_0$  已知的情况下，该电压值与被测介质等效电阻具有一一对应的关系，它的数值变化实际反映了等效电阻变化的情况，而在工程测量中要更加直观)。电压由 0.7 V~0.1 V 变化区段对应于冰层上表面 2 cm 厚度范围冰电阻情况。由于日照原因，冰表面有融化现象，厚度约 2 cm~3 cm；电压接近于零区段，对应于海冰结冰部份，其厚度大约 40 cm；电压高于 4 V，对应冰下水位部分；电压介于 0 V~4 V 部分反映的是冰层下界面冰水混合层电阻变化情况，这个曲线反映了检测瞬间海冰内部各高度位置所处的物理状态。

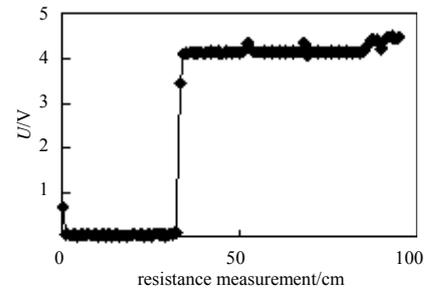


Fig.5 Typical observed curve of Antarctic sea ice  
图 5 南极中山站海冰观测数据典型曲线

黄河中上游内蒙古托克托县头道拐黄河冰情试验<sup>[7]</sup>：采用图 4 所示河道冰水情连续自动数据检测系统，与黄河水利委员会宁蒙水文水资源局科技人员合作于 2009 年 12 月中旬至 2010 年 3 月，在内蒙古托克托县头道拐黄河河道进行了 3 个多月的冰水情现场连续远程自动监测预报试验，获得了黄河河道系统的定点冰层厚度和温度监测数据，同时还获得黄河冰凌图像信号，为建设黄河冰凌灾害预报系统提供了一种可行的工程应用模式与设备。图 6 为黄河封冻期间系统采集得到的典型的冰层内部等效电阻、温度梯度数据曲线，图 7 为通过 GPRS 图像数据传输系统在实验室接收到的黄河冰凌图像信号。其中，图 7(c)是经过图像处理后的冰凌轮廓图，可以用来分析河道冰凌密度分布情况。

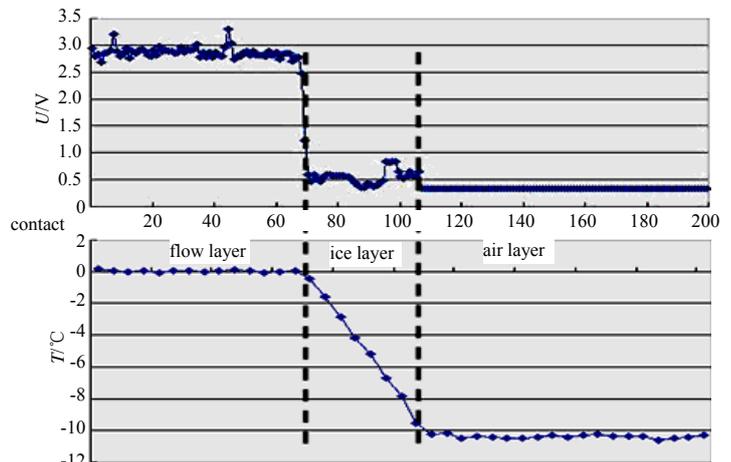


Fig.6 Measured voltage and temperature curves of frozen river ice at 18:19 on February 26, 2009 by R-T hydrological sensor  
图 6 2009 年 2 月 26 日 18 点 19 分 R-T 冰水情传感器实测封冻黄河冰层电压和温度曲线



(a) ice image transmitted when the Yellow River thaws



(b) untreated ice image



(c) ice image after treatment

Fig.7 Yellow River ice image signal received through GPRS image data transmission system in the laboratory

图 7 通过 GPRS 图像数据传输系统在实验室接收到的黄河冰凌图像信号

试验用 R-T 冰水情传感器量程为 2 m,  $V_{CC}=3.3\text{ V}$ ,  $R_0=10\text{ M}\Omega$ ，温度传感器采用 DS18B20。试验时传感器垂直安置于河道中，露出河道冰面高度为 96 cm，图 6 中横坐标为传感器的触点数，触点数值 0 对应传感器浸泡在河水最低处的垂直位置。纵坐标为冰层厚度传感器获得的反映各检测垂直平面分压电阻  $R_0$  两端得到的采样电压值以及各触点温度值。利用 1.2 节所述空气、冰与水的等效电阻取值规律，在  $R_0$  值固定情况下，水流层(等效电

阻小于  $R_0$ ) 的电压值应最高, 冰层(等效电阻接近  $R_0$ ) 次之, 空气层(等效电阻大于  $R_0$ ) 低。对照图 6 中 2.5 V~3.3 V 曲线变化区段对应水流层, 0.35 V~2.5 V 变化区间对应冰层, 0.35 V 以下对应空气层, 其反映的真实冰层厚度与冰下水位与现场实测结果完全一致; 而水、冰、空气温度曲线也全面反映了黄河河道内部的实际情况。

#### 4 结论

冰水情检测地处野外, 工作环境恶劣, 很多情况下交通、供电等条件都不具备, 而要实现河道、水电大坝冰水情信息的长时间连续自动采集更是不易。通过工程应用实践证明, 基于空气、冰与水的电阻特性差异对河道、水电大坝冰水情进行连续自动检测是完全可行的, 特别是在完全封冻的条件下, 通过对监测断面设置多个数据采集点, 可以全面掌握冰层内部生消变化全过程的信息, 对于冬季水文信息的收集、水电大坝的安全运行与防冰凌灾害预报可以提供一种新的工程应用冰情检测方法及设备。

#### 参考文献:

- [1] LU Peng, LI Zhijun, DONG Xilu, et al. Sea ice thickness and concentration in Arctic obtaining from remote sensing images[J]. Chinese Journal of Polar Science, 2004, 15(2): 91-97.
- [2] 秦建敏, 沈冰. 电导率冰层厚度传感器及其检测原理[C]// 第九届全国敏感元件与传感器学术会议(STC'5)论文集. 北京: 国防工业出版社, 2005. (QIN Jianmin, SHEN Bing. Conductivity ice thickness sensor and the detection principle[C]// The 9th national sensitive components and sensor academic conferences. Beijing: Defense Industry Press, 2005.)
- [3] 秦建敏. 基于空气、冰与水的电导率检测冰厚的理论与应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (QIN Jianmin. Research on Theory and Application of Detecting the Thickness of Ice Layer Based on Distinct Conductivity of Air, Ice and Water [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.)
- [4] 张志栋. 全天候流域河道水情现场采集系统的设计与研制[D]. 太原: 太原理工大学, 2009. (ZHANG Zhidong. All-weather basin river regime field collection system design and development[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.)
- [5] 彭浩. 黄河河道冰情定点连续自动测报系统的设计与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010. (PENG Hao. The Yellow River ice fixed-point continuous automatic telemetry system design and research[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.)
- [6] 李霞. 利用空气、冰与水的电阻、温度特性差异进行冰情检测的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008. (LI Xia. By using the air, ice and water resistance, temperature characteristic difference between ice detection applied research[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.)
- [7] 秦建敏, 程鹏, 秦明琪. 冰层厚度传感器及其检测方法[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 418-421. (QIN Jianmin, CHENG Peng, QIN Mingqi. Ice layer-thickness sensor and its measuring method[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 418-421.)
- [8] QIN Jianmin, CHENG Peng, ZHAO Baofen, et al. Research on a New Measurement Method of Ice Thickness[C]// Proceedings of the 19th IAHR International Symposium on Ice. Canada: [s.n.], 2008: 361-368.
- [9] 李蓉. 基于无线局域网监控系统的技术优化方案[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(3): 237-239. (LI Rong. Optimized Project of Surveillance System Based on Wireless Local Area Network[J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(3): 237-239.)
- [10] 汪渝, 熊德琪. 基于 GPRS/GPS 的海上溢油远程无线监测系统[J]. 信息与电子工程, 2007, 5(2): 81-85. (WANG Yu, XIONG Deqi. Remote Wireless Monitoring System of Oil Spill with GPRS/GPS[J]. Information and Electronic Engineering, 2007, 5(2): 81-85.)

#### 作者简介:



秦建敏(1951-), 男, 太原市人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事检测技术与自动化装置、冰水情信息自动化检测技术等领域的研究. email: qinjm\_cn@yahoo.com.cn.

刘笑达(1982-), 男, 太原市人, 工学硕士, 从事检测技术与自动化装置的研究. email: liuxd@tyut.edu.cn.

李学春(1961-), 男, 陕西省榆林市人, 高级工程师, 从事水文资源管理的研究.