

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2020.0067

刘辉,冀鸿兰,牟献友,等.基于无人机载雷达技术的黄河冰厚监测试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):217-224. LIU H,JI H L,MOU X Y,et al. Experimental study on Yellow River ice thickness monitoring testbased on UAV radar technology[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(3):217-224. (in Chinese)

# 基于无人机载雷达技术的黄河冰厚监测试验

刘辉<sup>1</sup>,冀鸿兰<sup>1</sup>,牟献友<sup>1</sup>,郜国明<sup>2</sup>,张宝森<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院,郑州 450003)

**摘要:**河道冰厚是黄河防凌研究的重要指标,目前通过人工钻孔或触冰式探地雷达获取黄河冰厚均要求河流稳定封冻,且工作人员必须在冰面上作业。因此,积极探索更加高效的非接触式冰厚获取方法意义重大。利用无人机搭载探地雷达对黄河什四份子弯道冰厚进行探测,通过现场人工钻孔测量冰厚数据反算雷达波在冰层中的传播速度。结果表明,弯道冰厚分布不均匀,凹岸侧冰厚比凸岸侧大;清沟断面最大冰厚 91 cm,最小冰厚 19 cm,靠近水面附近冰厚较小;雷达测量与人工测量结果基本吻合,平均误差不超过 2 cm。实践证明,无人机载雷达回波图可直观地反映空气-冰、冰-水界面及冰厚情况,且探测方法具有快速、高效、安全等优点。研究结果对于开发黄河冰厚全新化的监测技术具有重要参考价值。

**关键词:**无人机;探地雷达;冰厚;黄河;什四份子

中图分类号:TV147 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Experimental study on Yellow River ice thickness monitoring testbased on UAV radar technology

LIU Hui<sup>1</sup>,JI Honglan<sup>1</sup>,MOU Xianyou<sup>1</sup>,GAO Guoming<sup>2</sup>,ZHANG Baosen<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;  
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** River ice thickness is an important indicator of ice prevention. At present, the ice thickness is measured by drilling or contact-type GPR required stably freeze-up. Therefore, it is of great significance to actively explore more efficient non-contact ice thickness detection methods. The UAV was equipped with the GPR to detect the ice thickness of the Shensifenzi bend of the Yellow River. The radar propagation velocity in the ice was calculated by using ice thickness data from the field of artificial drilling. The results showed that the distribution of ice thickness at the bend was uneven. The ice thickness on the concave bank was larger than that on the convex bank. The maximum ice thickness of the lead section was 91cm, the minimum ice thickness of the lead section was 19cm, and the ice thickness near the water surface was small. The ice thickness measured by radar was basically consistent with the measured by drilling, and the average error was less than 2 cm. The practice has proved that UAV radar images can directly reflect the air-ice interface and ice-water interface and ice thickness. The detection method has fast advantages, high efficiency and safety. The research results have important reference value for the development of new monitoring of the Yellow River ice thickness.

**Key words:** unmanned aerial vehicle(UAV); ground penetrating radar(GPR); ice thickness; Yellow River; Shensifenzi

收稿日期:2019-05-14 修回日期:2019-09-30 网络出版时间:2019-10-14

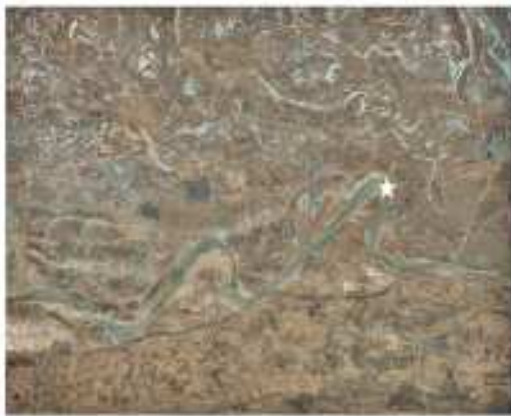
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191014.0931.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508401);2018 内蒙古自治区应用技术与开发基金项目(201802104);国家自然科学基金(51569020)

作者简介:刘辉(1995—),男,山东新泰人,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:1125083298@qq.com

通信作者:牟献友(1969—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:mouxianyou@163.com

黄河宁蒙河段和下游河段是凌情灾害重点防控河段<sup>[1]</sup>,每到冬春时期,内蒙古段的冰封长度累计达 700 多 km,河道冰盖宽度也有数百米,冰层厚度 0.7~1.2 m<sup>[2]</sup>。冰厚是冰凌成因分析及预报<sup>[3]</sup>、冰工程<sup>[4]</sup>研究中最基本的指标之一,无论是冰的防治,还是冰的利用,冰厚度均是一个关键参数<sup>[5]</sup>,也是比较难监测的物理指标<sup>[6]</sup>。目前,人工钻孔测量是最为可靠的测量方式,但存在着劳动强度大、工作效率低、测量误差大、作业安全性差及应急机动能力低等诸多弊端<sup>[7]</sup>。随着雷达行业的不断发展,雷达技术被广泛应用于各研究领域,如雷达测深<sup>[8]</sup>、雷达测雨<sup>[9]</sup>等。探地雷达具有体积小、连续性强、效率高、测量范围大等特点,在冰川冰<sup>[10-13]</sup>、海冰<sup>[14-16]</sup>的监测中得到很好的应用。近几年,探地雷达在河流冰情测量中的应用也愈加广泛。张宝森等<sup>[5]</sup>利用探地雷达测量了黄河内蒙古头道拐水文站河道断面冰厚;曹晓卫等<sup>[17]</sup>利用探地雷达测量了黄河弯道及桥墩周围冰厚;刘之平等<sup>[18]</sup>设计了冰水情一体化双频雷达测量系统。探地雷达测量冰厚虽然未破坏冰盖,但多是原位冰面测量,在使用时要求河流稳定封冻、工作人员必须在冰面上作业,在河流初封期和开河期冰层不稳定的情况下则不能使用,极大限制了测量的时间和空间,因此寻求更加高效的非接触式测量方法是必然趋势。



(a) 弯道位置



(b) 断面布设

图 1 研究区位置与断面分布

Fig. 1 Location and section distribution of the study area

本次试验采用大连中睿科技发展有限公司生产的飞航式快速测冰雷达系统,主要由探地雷达、无人机、后处理软件等组成,图 2 所示为组装之后的设备。此次试验工作量较大,人工钻孔较多,为了保证雷达测量与人工测量的时效性,待弯顶处的 3 个断面人工钻孔结束且冰厚测量完成后,启动无人机,设置自动航线定点测量。无人机起飞后,在断面测点上空会悬停 3~5 s,随后对所处位置的冰厚进行探

测。当无人机从一个测点飞向另一个测点时,雷达依然处在不断发射电磁波的状态,故一次断面飞行可满足定点和连续两种探测要求。

无人机作为一种新型的观测平台,它的优势主要体现在机动性强、事故率低、操作灵活、探测区域受限制小<sup>[19]</sup>,无人机与探地雷达相结合,可以更好地发挥两者的优势。在初封期与开河期,人不能在冰面上活动的情况下可用无人机搭载雷达探测冰厚,真正达到非接触探测要求。

本文主要研究内容是在前人经验基础上采用无人机搭载 400 MHz 频率探地雷达对黄河什四份子弯道稳封期的冰厚进行探测,通过现场打孔获取实际冰厚与雷达测量结果进行对比,验证机载雷达测量的准确性,旨在探究无人机载雷达对黄河冰厚探测的可能性,为非接触式冰厚探测技术提供参考和经验积累。

## 1 测量区域与测量方案

2019 年 1 月中旬,选取黄河典型内蒙古河段什四份子弯道开展冰厚监测试验。由于弯道地形的特殊性,在弯道处浮冰及冰花易堆积形成冰塞、冰坝<sup>[17]</sup>,几乎每年都会发生卡冰现象。测量位置与断面分布见图 1,此次试验共选取 4 个断面,其中在弯顶处布设 3 个断面,在下游清沟处布设 1 个断面,弯顶处的 3 个断面每个断面垂直于河道间隔 10 m 或者 20 m 布置测点,进行人工钻孔获取实际冰厚。由于各断面长度不同,故 1-1 断面布设 23 个测点,2-2 断面布设 21 个测点,3-3 断面布设 14 个测点。

测。当无人机从一个测点飞向另一个测点时,雷达依然处在不断发射电磁波的状态,故一次断面飞行可满足定点和连续两种探测要求。

## 2 数据处理方法

### 2.1 冰层厚度计算

不同于探地雷达接触冰面的测量方法,无人机携带雷达悬于空中,距冰面有一定距离,电磁波在空



图2 飞航式快速测冰雷达

Fig. 2 Airborne rapid ice measurement radar

气中传播距离会较长,但在可飞行高度范围内,无人机高度的波动对探测结果无影响。测冰雷达可高效地获取冰层厚度的空间分布情况,冰层最大探测厚度超过 6 m,无人机飞行速度在 18 m/s 以内,最大遥控距离 2 km。根据电磁波传播理论,电磁波在材料中的传播速度只与介电常数有关,由于空气、冰、水相对介电常数分别为 1、3~4、81,因此电磁波在三种介质中传播速度不同,接收到的信号可反映出不同介质界面的位置<sup>[5]</sup>。雷达测量冰层厚度时,向下发射高频率的电磁波,当到达空气-冰界面和冰-水界面时发生反射,如图 3 所示,反射的电磁波被接收天线接收,然后进行数据处理<sup>[20]</sup>,假设雷达波到达两个界面和返回接收端的时间相同,因此计算冰厚时只用到双程历时的一半。

根据电磁波在冰层中传播的双程历时及冰层的介电常数,可采用下式计算冰层的厚度。

$$D = \frac{vt}{2} = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

式中: $D$  为冰层厚度,cm; $v$  为电磁波在冰层中的传播速度,cm/ns; $t$  为电磁波在冰层中的双程历时,ns; $c$  为电磁波在空气中的传播速度,30 cm/ns; $\epsilon$  为冰层的介电常数(经标定后取 3.2)

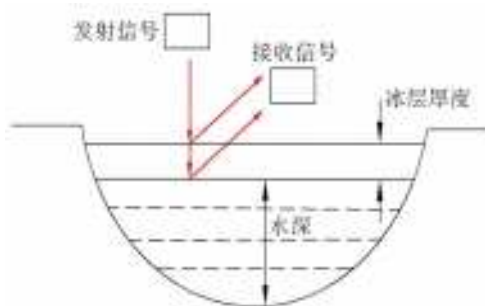


图3 雷达测冰厚工作原理

Fig. 3 Radar ice thickness working principle

雷达发射的电磁波在冰层中的传播速度是探测结果准确性的关键影响因素,采用反算法来推求,由式(1)可得

$$v = \frac{2D}{t} \quad (2)$$

式中: $D$  为人工测量冰厚,cm; $t$  为电磁波在冰层中的双程历时,ns, $t$  可由雷达后处理软件生成的厚度报表中得到。

从弯顶 3 个断面中,每个断面各选取具有代表性的 3 个测点的人工实测冰厚,利用式(2)求得雷达波在冰层中的传播速度,见表 1。另外,根据实测冰厚反演探测时冰层的有效介电常数,经计算 9 个测次的平均介电常数为 3.201。

李志军等<sup>[21]</sup>对雷达波在冰层中传播速度进行了相关研究,研究结果表明:雷达波在粒状冰中的传播速度 17.02 cm/ns,在柱状冰中的传播速度 16.98 cm/ns,本次试验雷达波在稳封期冰层中的平均传播速度 16.81 cm/ns,与前人结果基本吻合。雷达波在冰层中传播速率除了受到冰体结构、冰层含水含沙量以及冰内气泡等影响外,还受到冰水界面平整程度的影响,由于冰水界面比较复杂,参差不齐,雷达波束开角内的冰水界面各个小单元的反射信号相位是随机变化的<sup>[22]</sup>,雷达波反射会有偏差,因此对于介电常数的界定以及在冰层不平整情况下探测的准确性等还需进一步讨论。

表1 雷达波在冰层中传播速度

Tab. 1 The radar propagation velocity in the ice

编号	人工实测冰厚/cm	雷达波双程历时/ns	雷达波传播速度/(cm·ns <sup>-1</sup> )	平均速度/(cm·ns <sup>-1</sup> )
1	72	8.515	16.91	
2	55	6.797	16.18	
3	54	6.485	16.65	
4	56	6.828	16.40	
5	64	7.032	18.23	16.81
6	64	7.578	16.89	
7	76	8.516	17.85	
8	54	6.953	15.53	
9	53	6.406	16.65	

## 2.2 测量数据提取

测量数据经过后处理软件处理呈现出较清晰的回波图像,图 4 依次为弯顶处的 3 个断面及清沟断面的部分回波图,此时为稳封期,图中可以清晰地看到空气-冰分界面和冰-水分界面及冰厚情况。通过观察后期影像中无人机的悬停与飞行状态可以确定单点钻孔处雷达测量的道号范围,如图 4(b)所示

的区间内为单点测量的雷达回波,取此区间范围内冰厚平均值或者任意冰厚值即为雷达单点测量结果,本文取的是区间冰厚平均值。出于安全考虑,未对清沟断面进行人工单点测量,清沟断面无实际冰厚数据作对比,所以对有人工实测数据的断面进行单点测量结果分析,对清沟断面进行连续性测量结果分析。

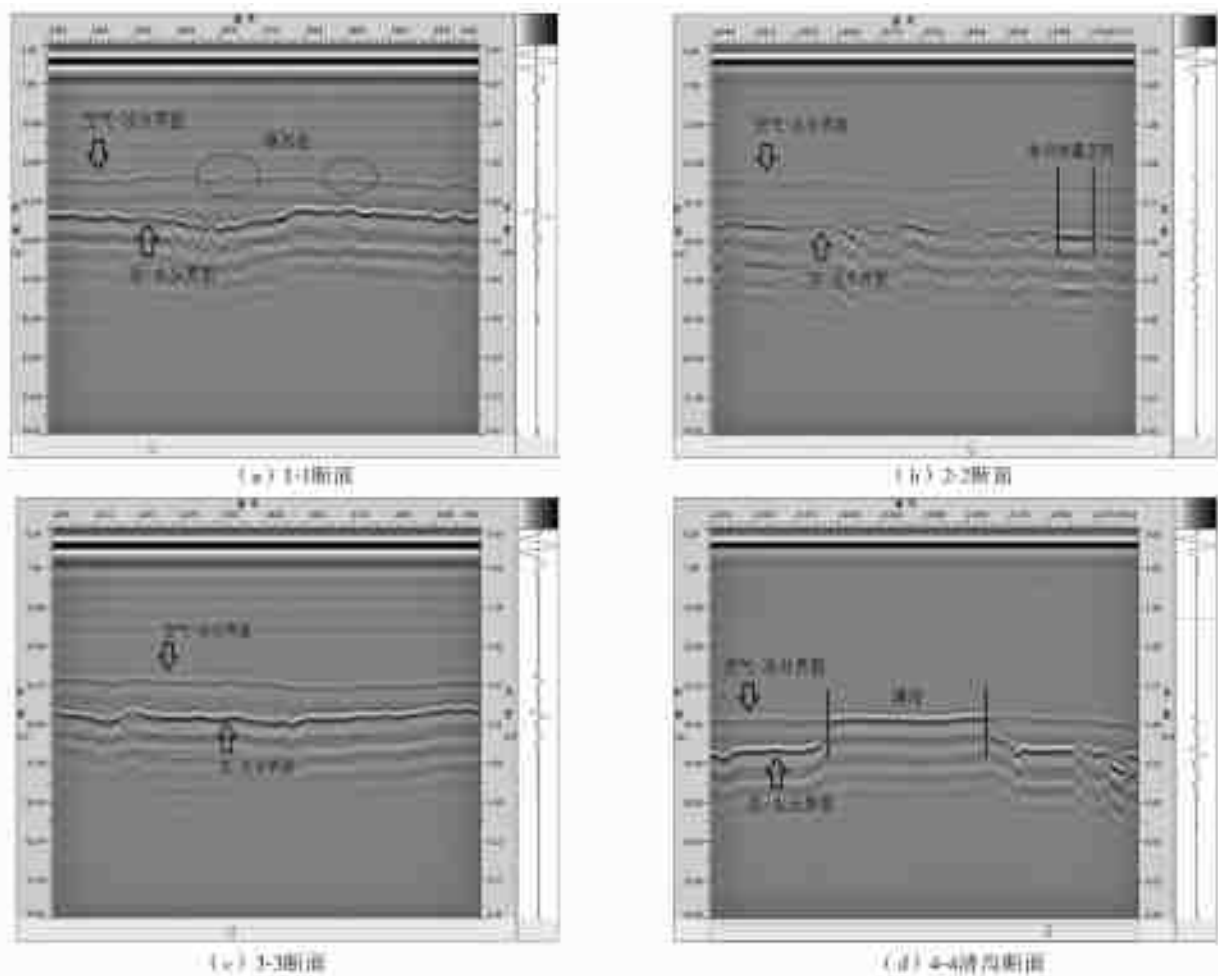


图 4 各断面部分回波图像

Fig. 4 Part of radar image for each section

## 3 结果分析

### 3.1 雷达与人工单点测量结果分析

为了检验雷达探测结果的准确性,计算雷达测量值的标准差和比测不确定度<sup>[23]</sup>

$$X = Z_{\alpha} \times S \quad (3)$$

式中: $X$  为观测值的不确定度,%; $Z_{\alpha}$  为相应于一定置信水平的置信系数,此次观测次数足够,故  $Z_{\alpha}$  取 2,对应置信概率为 95%。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中: $S$  为观测值的标准差; $\Delta_i$  为第  $i$  个观测值与实

测值之差; $n$  为比测次数。

根据上述两式计算得到雷达测量和人工实测的标准差为 3.9%,比测不确定度为 7.8% < 10%,满足河流冰情观测规范(SL 59—2015)中的要求。

对弯顶处 3 个断面全部测点的冰厚进行相关性分析,如图 5(d)所示,可以看出雷达探测结果与人工实测结果具有较好的相关性, $R^2 = 0.887$ 。分析表明雷达测量结果与人工测量结果基本吻合,误差在规定范围内,利用无人机载雷达设备探测黄河冰厚的方法可行。

1-1 断面人工测量平均冰厚为 57 cm,雷达测量平均冰厚为 58 cm;2-2 断面人工测量平均冰厚为



64 cm,雷达测量平均冰厚为 62 cm;3-3 断面人工测量平均冰厚为 61 cm;雷达测量平均冰厚为 63 cm,平均误差不超过 2 cm。对弯顶处 3 个断面共 58 个测点雷达与人工探测结果对比发现:误差在 5% 以内的测点有 41 个,占总测点数的 70.7%;误差在 5%~10% 的测点有 12 个,占总测点数的 20.7%;误差在 10%~15% 的测点有 4 个,占总测点数的 6.9%;误差大于 15% 的测点有 1 个。整体而言,凹岸侧误差相对大于凸岸侧。

黄河什四份子弯道由于其本身地形的独特性,极易形成冰塞、冰坝,现场观测到弯道凹岸多为立

封,凸岸多为平封,见图 6。立封会给机载雷达探测带来难度,无人机搭载雷达从断面上空飞过,电磁波传播到钻孔附近立封上插的堆冰会发生反射,钻孔过程中从冰下捞出的碎冰及冰花也会使冰孔附近的冰层变高,如图 4(a)所示,导致个别雷达测量结果比人工测量结果大,立封区的误差较大。在钻孔过程中,冰孔附近发生磨损,使用量冰尺只能测得单点位置的冰厚,冰下是不规则的,故量冰尺测量位置不同也会给测量结果带来误差。总体而言,机载雷达对于立封冰面效果一般,在平封冰面适用度更高,效果更好。

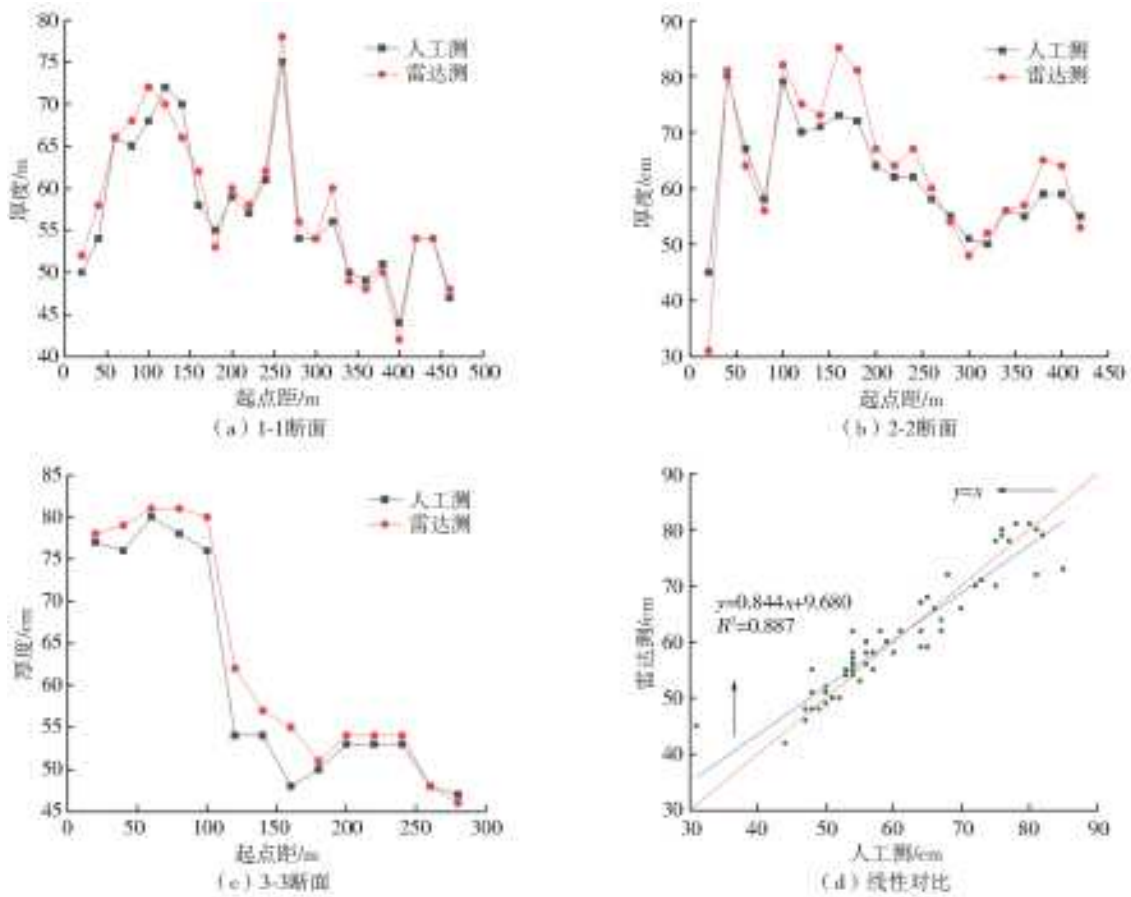


图 5 雷达测冰厚与人工测冰厚的对比

Fig. 5 Comparison of the ice thickness measured by the radar and the drilling

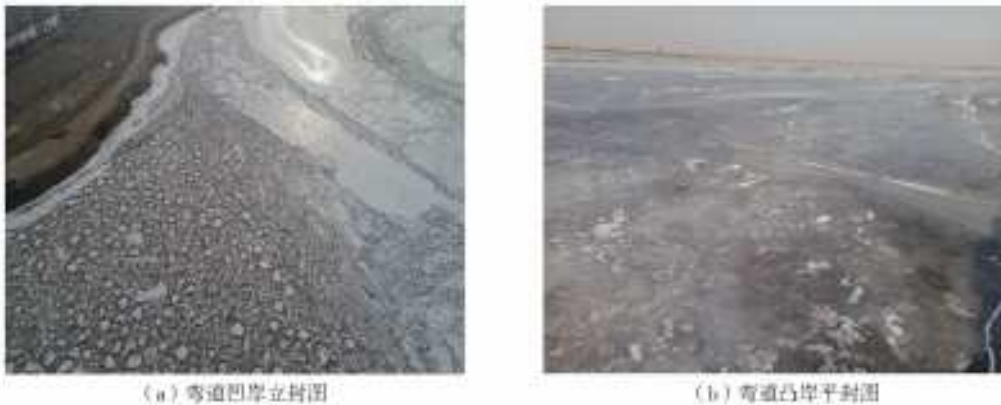


图 6 河道冰情

Fig. 6 Ice regime in river

### 3.2 冰厚分析

从图 5(a)、5(b)、5(c)可以看出,弯顶河道断面冰厚分布不均匀,冰面形态不平整,机载雷达测量与人工测量结果虽有一定误差但整体趋势基本一致:凸岸冰厚相对较小,冰厚在 50~60 cm 居多,凹岸冰厚相对较大,冰厚在 70~80 cm 居多,1-1 断面与 2-2 断面中间 1~2 个测点冰厚较大。冰盖下测速后得出测量断面范围内主河道在凸岸侧,流速较大,水流对冰底冲刷,水流带来的浮冰和冰花不能平稳堆积,且由于弯道独特的地形,大量的冰盘、浮冰及冰花向凹岸移动并堆积,凹岸流速较小并能自然冻结,造成凹岸冰层较厚,前两个断面中间 1~2 个测点流速几乎为零,水流平稳,水深较小,由此推断此处为浅滩,冰层较厚。此外黄河本身泥沙含量较高,泥沙对黄河的冻结过程也会产生一定影响<sup>[17]</sup>。由此可见,弯道影响冰的冻结过程,进而影响冰厚的整体分布。

图 4(d)回波图中两个界面重合的部分即为清沟,两侧为冰厚,4-4 清沟断面冰厚见图 7,凸岸侧平均冰厚 57 cm,凹岸侧平均冰厚 53 cm,整个断面最大冰厚 91 cm,最小冰厚 19 cm。清沟断面冰厚分布不均匀,空间分布无规律,垂直河道方向,靠近水面冰厚较小,这是由于清沟水内冰生成时释放热量延缓冰层的生长,且清沟内水流速度相对较大,水流的冲刷也会影响冰层的生长。根据现场观测,靠近水面位置冰面较为平滑,清沟与河岸中间位置堆冰较为严重,见图 8,测冰雷达探测清沟断面冰厚时断面上堆冰无法清理,在后处理软件分析过程中默认冰面是平整的,另一方面,冰下也凹凸不平,水流冲刷形成冰下沟壑,冰花、碎冰也会在流速小的地方堆积,上凸、下凸两者结合会导致部分冰厚异常增大,如图 7 方框标记处所示。

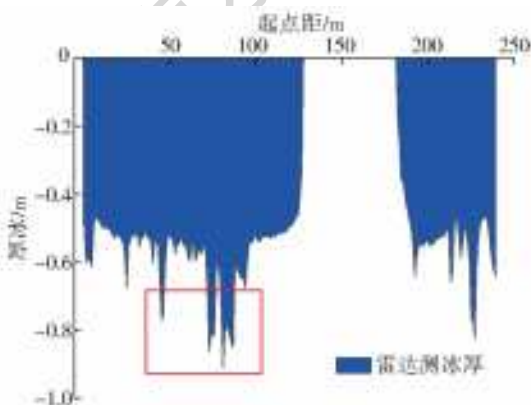


图 7 清沟断面冰厚

Fig. 7 Lead section ice thickness

无人机载雷达探测清沟断面冰厚的试验,基本解决了以往人工钻孔及拖拽雷达无法测量清沟断面

冰厚的困难,将测量范围扩大至整个河段,不再受空间限制。



图 8 清沟断面

Fig. 8 Lead section

### 4 结论

为了探索更加高效的非接触式冰厚测量方法,利用无人机载雷达对黄河什四份子段冰厚进行探测。结果表明,无人机载雷达可高效地获取冰厚的空间分布情况,雷达回波图能反映空气-冰、冰-水界面及冰厚,什四份子弯道断面冰厚分布不均匀,凹岸侧冰厚比凸岸侧大;清沟断面冰厚分布不均匀,最大冰厚 91 cm,最小冰厚 19 cm,水内冰生长及水流运动影响靠近清沟位置冰的生长,导致其冰厚较小;与人工实测冰厚比较,精度验证结果  $X=7.8\%$ ,  $R^2=0.887$ ,误差在规定范围内,河道立封堆冰对探测有一定影响,平封处精度略高,总体效果较好。利用无人机载雷达可将冰厚测量范围扩大至整个冰期,不再受时间空间的限制,无人机搭载探地雷达探测黄河冰厚的方法可行,未来值得推广。

#### 参考文献(References):

- [1] 翟家瑞. 黄河防凌与调度[J]. 中国水利, 2007, 3(3): 34-37. (ZHAI J R. Ice jams prevention and regulation in the Yellow River[J]. China Water Resources, 2007, 3(3):34-37. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2007. 03. 013.
- [2] 刘东常, 孟闻远, 谢巍, 等. 黄河冰塞冰坝防治研究新思路[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(2): 1-4. (LIU D C, MENG W Y, XIE W, et al. New ideas of prevention and control of ice jam and ice dam in Yellow River[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydropower, 2011, 32(2): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10. 19760/j. ncwu. zk. 2011. 02. 001.
- [3] 霍世青, 温丽叶, 范旻昊, 等. 2014—2015 年度黄河宁夏河段凌情及气象成因[J]. 人民黄河, 2016, 38(2):

- 16-18. (HUO S Q, WEN L Y, FAN M H, et al. Analysis of ice flood characteristics and meteorological causes at Ningxia-Inner Mongolia Reach of year 2014-2015 [J]. *Yellow River*, 2016, 38(2): 16-18. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2016.02.005.
- [4] 刘诗华,侯树强.寒区核电厂取水口防冰设施设计研究[J].*人民黄河*,2015,37(5):112-115. (LIU S H, HOU S Q. Research on ice-preventing facility schemes of water-intake in a nuclear power plant in cold regions [J]. *Yellow River*, 2015, 37(5): 112-115. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2015.05.029.
- [5] 张宝森,张防修,刘滋洋,等.黄河河道冰层雷达波特征图谱的现场实验研究[J].*南水北调与水利科技*,2017,15(1):121-125. (ZHANG B S, ZHANG F X, LIU Z Y, et al. Field experimental study of the characteristics of GPR images of Yellow River ice[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(1): 121-125. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.01.020.
- [6] 雷瑞波,李志军,秦建敏,等.定点冰厚观测新技术研究[J].*水科学进展*,2009,20(2):287-292. (LEI R B, LI Z J, QIN J M, et al. Investigation of new technologies for in-situ ice thickness observation[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 287-292. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2009.02.006.
- [7] 刘晓凤.雷达技术在水文冰厚测量上的应用试验[J].*水文*,2016,36(4):66-69,43. (LIU X F. Application of radar technology in ice thickness measuring[J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(4): 66-69, 43. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2016.04.012.
- [8] 赵永辉,吴健生,万明浩.不同地下介质条件下探地雷达的探测深度问题分析[J].*电波科学学报*,2003,18(2):220-224. (ZHAO Y H, WU J S, WAN M H. The analysis of detectable range of ground-penetrating-radar system in different underground medium[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18(2): 220-224. (in Chinese)) DOI:10.13443/j.cjors.2003.02.021.
- [9] 张利平,赵志朋,胡志芳,等.雷达测雨及其在水文水资源中的应用研究进展[J].*暴雨灾害*,2008,27(4):373-377. (ZHANG L P, ZHAO Z P, HU Z F, et al. An overview of precipitation measured by radar and its application on hydrology and water resources [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2008, 27(4): 373-377. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:HBQX.0.2008-04-020.
- [10] 孙波,何茂兵,张鹏,等.天山1号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分析[J].*极地研究*,2003,15(1):35-44. (SUN B, HE M B, ZHANG P, et al. Determination of ice thickness, subice topography and ice volume at glacier no. 1 in the Tien Shan, China, by ground penetrating radar [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1): 35-44. (in Chinese))
- [11] 吴利华,李忠勤,王璞玉,等.天山博格达峰地区四工河4号冰川雷达测厚与冰储量估算[J].*冰川冻土*,2011,33(2):276-282. (WU L H, LI Z Q, WANG P Y, et al. Sounding the Sigong river glacier No. 4 in Mt. Bogda area, the Tianshan mountains by using ground penetrating radar and estimating the ice volume[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 276-282. (in Chinese))
- [12] 周建民,李震,李新武.基于ALOS/PALSAR雷达干涉数据的中国西部山谷冰川冰流运动规律研究[J].*测绘学报*,2009,38(4):341-347. (ZHOU J M, LI Z, LI X W. Research on rules of the valley glacier motion in western China based on ALOS/PALSAR interferometry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(4): 341-347. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:CHXB.0.2009-04-015.
- [13] 王宁练,蒲健辰.祁连山八一冰川雷达测厚与冰储量分析[J].*冰川冻土*,2009,31(3):431-435. (WANG N L, PU J C. Ice thickness, sounded by ground penetrating radar, on the Baiy Glacier in the Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 431-435. (in Chinese)) DOI: http://ir.casnw.net/handle/362004/20698.
- [14] 孙波,温家洪,康建成,等.北冰洋海冰厚度穿透雷达探测与下表面形态特征分析[J].*中国科学(D辑:地球科学)*,2002,32(11):952-958. (SUN B, WEN J H, KANG J C, et al. Radar detection and lower surface morphological characteristics of sea ice thickness penetration in the Arctic Ocean[J]. *Science in China (SeriesD)*, 2002, 32(11): 952-958. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:JDXK.0.2002-11-009.
- [15] 孙波.基于二维和三维探地雷达方法探测北冰洋夏季海冰厚度及其下表面形态特征分析[A].*第二届环境与工程地球物理国际会议论文集*[C].武汉,2006. (SUN B. Analysis of summer sea ice thickness and its surface morphological characteristics in the Arctic Ocean based on Two-Dimensional and Three-Dimensional ground penetrating radar method[A]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics*[C]. Wuhan, 2006. (in Chinese))
- [16] 王帮兵,孙波,田钢,等.利用三维GPR探测北极夏季海冰厚度及下表面形态特征分析[J].*物探与化探*,2007,31(3):189-192. (WANG B B, SUN B, TIAN G, et al. The application of the 3D GPR method to measuring the depth of arctic summer sea ice and

- analyzing its underside morphology[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2007, 31(3): 189-192. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; WTYH. 0. 2007-03-000.
- [17] 曹晓卫, 李春江, 颜小飞, 等. 利用探地雷达探测黄河弯道及桥墩周围冰层厚度[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6): 91-95. (CAO X W, LI C J, YAN X F, et al. Measuring ice thickness around the curve and piers in the Yellow River with ground penetrating radar [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 91-95. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 06. 016.
- [18] 刘之平, 付辉, 郭新蕾, 等. 冰水情一体化双频雷达测量系统[J]. *水利学报*, 2017, 48(11): 1341-1347. (LIU Z P, FU H, GUO X L, et al. Double frequency radar system for ice thickness and water depth measurement [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(11): 1341-1347. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170017.
- [19] 杨硕. 试论无人机航测在矿山测量中的应用[J]. *山东工业技术*, 2019(15): 73. (YANG S. Discussion on the application of aerial survey of unmanned aerial vehicles in mine surveying [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2019 (15): 73. (in Chinese)) DOI: 10. 16640/j. cnki. 37-1222/t. 2019. 15. 067.
- [20] 吴凯滨. 浅地层探地雷达合成孔径成像应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (WU K B. Application research on synthetic aperture imaging of shallow subsurface ground penetrating radar [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [21] LI Z J, JIA Q, ZHANG B S, et al. Influences of gas bubble and ice density on ice thickness measurement by GPR[J]. *Applied Geophysics*, 2010, 7(7): 105-13. DOI: 10. 1007/S11770-010-0234-4.
- [22] 崔华义, 郭纪捷. 相关技术在冰水界面测量中的应用[J]. *海洋技术*, 2004, 23(1): 35-37. (CUI H Y, GUO J J. The application of correlation in the measurement of ice-water interface [J]. *Ocean Technology*, 2004, 23 (1): 35-37. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-2029. 2004. 01. 008.
- [23] SL 59-2015, 河流冰情观测规范[S]. (SL 59-2015, Technical standard for observations of ice regime in open channels[S]. (in Chinese))
- .....
- (上接第 216 页)
- [11] 刘超, 周庆连, 钱均, 等. 双向流道立轴潜水泵系统流动特性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 59-65, 58. (LIU C, ZHOU Q L, QIAN J, et al. Study on flow characteristics of vertical shaft submersible pump system with two-way flow passage [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2016, 47 (10): 59-65, 58. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 008.
- [12] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 49-59. (LIU C. Research and development of axial flow-pump system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46 (6): 49-59. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 06. 008.
- [13] 王梦成, 咸国盛, 李昕, 等. 基于 CFX 的三种不同形式的双向泵站在自引自排工况下过流特性对比[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(5): 36-41. (WANG M C, XIAN G S, LI X, et al. Flow characteristics comparison of three different types of two-way flow passage based on CFX under gravity flow condition [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(5): 36-41. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1144. 2018. 05. 006.
- [14] 李彦军, 颜红勤, 葛强, 等. 大型低扬程泵装置优化设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 144-148. (LI Y J, YAN H Q, GE Q, et al. Optimum hydraulic design and model test of large-scale low-lift pump devices [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (9): 144-148. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2010. 09. 024.
- [15] 查智力, 刘超, 严天序, 等. 井筒式泵装置水力特性数值模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 189-195. (ZHA Z L, LIU C, YAN T X, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of wellbore pump installation [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2018, 16(2): 189-195. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0058.