

基于 ICEMAP 冰层雷达测厚仪测冰层厚度研究

李皖宁 赵鑫宏 杨忠 纪序

黑龙江红河谷汽车测试股份有限公司 黑龙江黑河 164300

摘要: 本文叙述了在东北地区基于 ICEMAP 冰层雷达测厚仪测冰层厚度的原理和系统结构。对黑河市主要水库进行了实际测量,并对测量结果进行了不确定度分析。通过测试原理和数据分析,验证了 ICEMAP 冰层雷达测厚仪测冰层厚的准确性。

关键词: 冰层雷达测厚仪;冰层厚度;不确定度

Research on ice thickness measurement based on ICEMAP ice radar thickness Gauge

Wanning Li Xinhong Zhao Zhong Yang Xu Ji

Heilongjiang Red River valley Automobile Testing Co., Ltd. Heilongjiang Heihe 164300

Abstract: This paper describes the principle and system structure of measuring ice thickness based on the ICEMAP ice layer radar thickness gauge in the Northeast region of China. The main reservoirs in Heihe City were actually measured, and the uncertainty of the measurement results was analyzed. Through the testing principle and data analysis, the accuracy of measuring ice thickness by the ICEMAP ice layer radar thickness gauge was verified.

Keywords: ice radar thickness gauge;ice thickness; uncertainty

引言

在我国北纬位于我国北纬 30° 以北的河流都会发生冰冻现象^{[1]-[2]}。在湖面行车,开展冬捕等活动,需要冰面足够的厚才能确保行车安全,在开展各项活动前需要测量冰层厚度,用于保障活动安全。传统的测冰厚度采用冰钻打眼,再用直尺测量冰层厚度,这种方法测量存在以下局限性:一是只能单点测量,不能保证整片区域的冰层厚度,无法保障湖面的作业安全,二是测试效率低下,准确度无法保障,因为测量时,需要直尺底端对齐冰面底端,读刻度时还需要平视冰面刻度来减少刻度误差,从而因人员和设备的不确定度导致测试结果的不确定度大。目前在大范围冰厚监测中,卫星遥感、雷达探测、舰载声纳等技术均较为成熟。探地雷达已经成功在冰川冰^{[3]-[5]}、海冰^{[6]-[7]}厚度测量中得到检验,效果较为理想。在淡水冰测量方面,张宝森等^{[8]-[10]}利用探地雷达对黄河头道拐水文站河道断面的冰厚进行了测量;刘之平等^[11]设计了冰水情一体化双频雷达测量系统;刘晓凤^[12]利用探地雷达测量了松花江的冰厚,测验效果良好。本文采用加拿大的 icemap 冰层厚度测量仪对黑龙江省黑河市大面积水库的冰层厚度进行测量,并采用不确定度评定方法^[13]分析其测量准确性。

一、测量原理

高频宽带电磁波以脉冲发送的方式从冰层表面向下发射式雷达冰厚探测的主要工作方式,水面或者其他介质与电

磁波在冰层传播中相遇会发生反射,冰层表面反射的雷达电磁波信号通过天线进行接收,雷达回波通过超宽带接收机进行信号转换后进行量化。DSP 信号处理器内嵌在雷达内结合回波幅度、走时、形状及极性,对冰层与水面分界面通过层位自动识别算法进行自动寻找,从而对冰层厚度进行估算^{[14]-[15]},测量原理如图 1 所示。

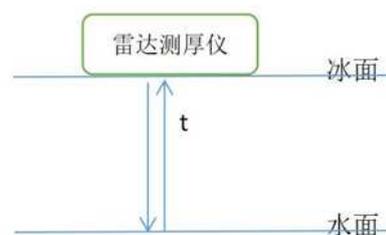


图 1 冰层雷达测厚仪测量原理图

Fig.1 Measuring principle diagram of ice radar thickness gauge

二、系统结构

icemap 冰层雷达测厚仪由雷达测厚仪由电源、雷达测厚仪主机、500MHz 数字天线、GPS 定位天线、数据采集器、无线数据传输器等组成。数据通过 wifi 无线传输至笔记本电脑终端,使用 icemap 软件进行数据处理。通过 GPS 天线定位测量轨迹,在软件中合成轨迹和冰层厚度的测量报告。冰层雷达测厚仪结构如图 2 所示。



图 2 冰层雷达测厚仪结构图

Fig.2 Structural drawing of ice radar thickness gauge

三、雷达实际测冰层情况

2021 年 12 月采用 icemap 冰层雷达测厚仪对黑龙江省黑河市及嫩江市一些重要水库进行了冰层厚度测试，现场测量标定及现场测量图片如图 3 所示，生成测量轨迹图及报告曲线图如图 4 所示。



图 3 现场测量标定及现场测量图

Fig.3. Field measurement calibration and field measurement diagram

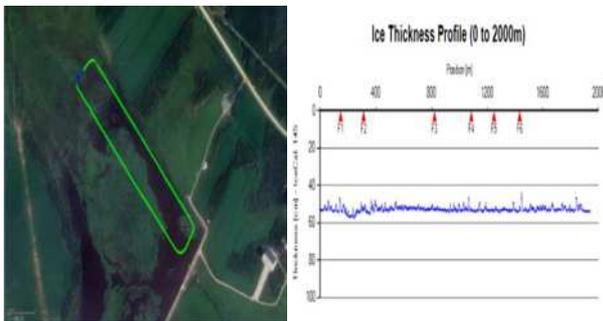


图 4 生成测量轨迹图及报告曲线图

Fig.4 Generate measurement track chart and report curve chart

经过实地测量，测试结果如下表 1 所示。由表 1 数据可知，不同的冰层厚度，传播速度不一致，冰层传播速度在

130~150mm/ns，约为雷达波在空气中传播速度的 1/2。为确定测量数据是否准确可靠，还需要对冰层雷达测厚仪进行测量不确定分析。

表 1：场地实际测量表

Table1 Field Actual Measurement Table

日期	场地	标定参数 cm	冰层传播速度 mm/ns	环境温度 °C
2021.12.07	龙江水库	52	145	-11
2021.12.08	卧牛湖水库	47	140	-12
2021.12.12	小乌斯力水库	45	136	-17
2021.12.14	象山水库	53.5	143	-22.5
2021.12.02	红旗水库	42	134	-10
2021.12.16	黑龙江面	36	139	-20
2021.12.17	二门山水库	59	148	-17
2021.12.18	五大连池	53.5	131	-18
2021.12.19	嫩江水库	61	143	-13

四、冰层厚度测量不确定度分析

测量不确定度是根据所用到的信息，表征赋予被测量值分散性的非负参数。

4.1 建立测量模型

$$h = c \times t / 2 \div \sqrt{\epsilon} \quad (1)$$

式中：h 为冰层厚度 (cm)；t 为双程用时 (ns)；ε 为冰的介电常数；c 为电磁波在真空中的传播速度 (30 cm/ns)。

4.2 分析不确定度的来源：

在测量过程中，测量不确定度主要有两方面因素影响，一是由测量时偶然因素引起的测量结果波动引入的 A 类不确定度；二是由时间测量参数 t 的不准确测量引入的 B 类不确定度。

4.3 A 类不确定度分量计算

由偶然因素引起的测量结果波动，采用多次测量重复测量结果的方式进行分析，如下表

2 所示，使用冰层厚度测量仪测量冰层厚度结果。

表 2: 6 次冰层厚度测量结果 单位: cm

Table2 Six measurements of ice thickness Unit: cm						
实际厚度	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次
52.2	52	52	52	52	52	52

$$\bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 52 \text{ (mm)}$$

$$s(x_6) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2}{6-1}} = 0$$

$$u_A = 0$$

4.4 B 类不确定度分量计算

由电磁波在冰层传输的双程时间 t 引起的误差用标准不确定度的 B 类评定, 按照现有的说明书信息加以评定。

从说明书中可知: 计时误差是 5ps, 没有指明 k , 则可以认为 $k = 2$ (对应约 95% 的置信概率), 由公式 1 可得:

$$s = vt / 2 = 0.005 \times 150 \div 2 = 0.375 \text{ (mm)}$$

$$\alpha = 0.375 \text{ (mm)}$$

$$u_B = \alpha / k = 0.375 \div 2 = 0.187 \text{ (mm)}$$

4.5 合成标准不确定度 $u_C(y)$ 的评定

因为 $u_A = 0$, 所以 $u_C = u_B = 0.178 \text{ (mm)}$

4.6 扩展不确定度 U

$$U = ku_C = 3 \times 0.178 = 0.514 \text{ (mm)}$$

考虑到设备最小测试刻度为 1cm, 测试扩展不确定度 $U < 1\text{cm}$, 因此设备测量准确度即为最小刻度值。即

$$h = 52 \pm 1 \text{ (cm)}$$

五、结论与展望

冬季东北地区可以采用 ICEMAP 雷达测冰层厚度对大型湖面冰层厚度进行测量, 其测量方便, 测试数据准确, 测量不确定度为 1cm。本设备在测试过程中采用汽车拖拉的方式, 在牵引车遇到危险时无法自救, 测量人员存在危险性。希望设计自行移动式雷达测厚仪, 用遥控器控制设备自行前进, 这样可以有效保护测试人员安全。

参考文献:

- [1] 崔丽琴. 河冰生消过程中关键物理参数的监测与研究[D]. 太原理工大学, 2015.
- [2] 汪恩良, 于俊. 几种常见冰厚观测方法的优劣分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(4): 48-54.
- [3] 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.
- [4] 孙占义, 张江齐, 张鹏. 雷达技术在珠穆朗玛峰冰雪层厚度测定中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(2): 179-182.
- [5] 李亚楠, 李真, 王宁练. 东昆仑山煤矿冰川雷达测厚及冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 38-46.
- [6] 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), 2022, 32(11): 952-958
- [7] 王野, 邵秘华, 谭靖, 等. 海冰厚度测量方法及仪器的应用研究[J]. 大连海事大学学报, 2006, 32(4): 113-115, 120.
- [8] 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.
- [9] 刘辉, 冀鸿兰, 罗红春, 等. 无人机载雷达在冰厚及冰层结构探测中的应用 [J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(6): 630-636.
- [10] 罗红春, 冀鸿兰, 郜国明, 等. 机载雷达在黄河稳封期冰厚测量中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 44-49, 54.
- [11] 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.
- [12] 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): 43, 66-69
- [13] 龚凯军, 李延军, 张杨杨. EKKPRO 地质雷达内部校准及不确定度分析[J]. 市政技术, 2018, 36(1): 199-202.
- [14] 高连琦. 雷达冰厚测量仪在辽宁地区河道冰情观测中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(5): 179-183.
- [15] 魏然, 牛玉朕. LTD-11 雷达冰厚测量仪在水文测验中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(1): 111-112.