

# 高原湖泊测量水深改正技术探讨

任 伟, 谭 良, 聂金华

长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌

收稿日期: 2021年11月9日; 录用日期: 2022年3月1日; 发布日期: 2022年4月21日

## 摘 要

高原湖泊测量属国家水利前期工作项目, 因为测区自然环境恶劣、地处无人区、安全风险极高、组织实施困难、测量技术要求高等特点, 故基本国情信息资料处于空白。湖泊容积量算是此项工作的重要内容之一, 通过水深测量算出湖泊容积并和湖面积、水位建立曲线关系。本文主要探讨了高原湖泊测量中水深测量的改正问题, 采用基于水深层内常梯度下的声线跟踪声速改正和Hypack软件水深改正两种不同的水深改正方法进行水深改正, 并对改正水深进行对比分析, 对改正效果进行评价, 通过分析找出适合西部湖泊容积量算的水深改正方法, 为后期西部重要湖泊测量提供技术参考。

## 关键词

容积量算, 水深测量, 声速

# The Measure Water Depth Correction Technology in Plateau Lake

Wei Ren, Liang Tan, Jinhua Nie

Three Gorges Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Yichang Hubei

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 1<sup>st</sup>, 2022; published: Apr. 21<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

The plateau lakes survey in Western China belongs to the preliminary work of national water conservancy. Because of the bad natural environment, the unmanned area, the high risk of safety, the difficulties of organization and implementation, and the high requirement of measurement technology, the information about the basic situation of China is in the blank. Lake volume measurement is one of the important contents of this work, the curve relationship with lake area and water level is established by

作者简介: 任伟, 1963年8月出生, 重庆市綦江区, 中专, 助理工程师, 主要从事水文勘测收集分析研究工作, Email: 1368238796@qq.com

文章引用: 任伟, 谭良, 聂金华. 高原湖泊测量水深改正技术探讨[J]. 水资源研究, 2022, 11(2): 181-186.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.112019

correct water depth. This paper mainly discusses the correction of bathymetry in the measurement of important lakes in the west. Two different depth correction methods are used to correct water depth: the sound line layer under the constant gradient velocity correction and tracking based on Hypack software of depth correction, the depth correction is compared and analyzed, the correction effect is evaluated, through the analysis to find suitable for Western Lake volume calculation method of depth correction, it affords the technique reference of later western important lakes measurement.

## Keywords

Volume Measurement, Bathymetry, Sound Speed

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

### 1.1. 高原湖泊声速特点

我国西部高原湖泊大多分布在内流区，气候干旱，水系不发育，入湖河流多为短小的间歇性河，湖泊补给水量小，湖泊补给形式以雨水和冰雪融水为主，水情丰、枯季节变化明显。湖泊水量平衡中湖水的损耗主要是强烈的湖面蒸发，湖水矿化度普遍较高，以微咸水湖和盐湖为主。少数有河川泄流的吞吐湖，吞吐水量亦较小，调节作用甚微。

湖水的热量主要来自太阳辐射，湖水在吸收太阳辐射能的同时又不断的与周围环境发生热量交换，因此湖水温度的空间分布主要受纬度和海拔高度的影响，总体来说纬度越高、海拔越高湖泊水温越低。西部湖泊普遍位于高海拔地区，水温受海拔影响明显，比同纬度湖泊水温普遍偏低。

湖泊冰情反映湖泊热量收支状况，我国湖泊冰情随海拔高程的增大，同样显示出鲜明的差别，如同处 N35° 以南的湖泊在青藏高原地区则普遍封冻。

水体中声速主要受水体温度、盐度、压力等因素影响，高原湖泊因其自身地理位置、气候、水情特点，湖内易出现湖水中声速不均的情况，且多表现为声速分层明显，水体表面与水体底部声速相差较大。

### 1.2. 高原湖泊水深测量难点

水深测量过程中测深采用超声波测深仪测深、GNSS 平面定位，系统组成见图 1。

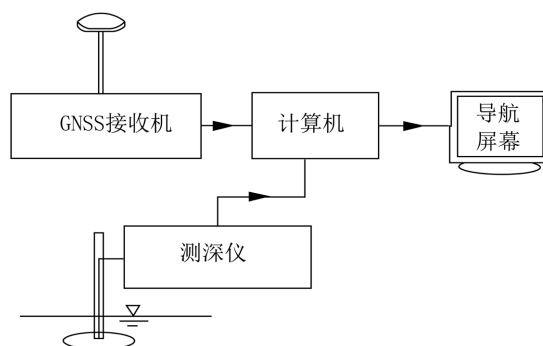


Figure 1. Frame diagram of bathymetric system

图 1. 水深测量系统框图

水深测量主要是测量声波在水中往返传播的时间从而计算深度,当水体自上而下声速稳定,测深仪可采用容易获取的表层声速测量,且测量效果好。西部湖泊水体内声速不均,存在分层或多变的情况下,水深外业测量不能简单采用水体表层声速测量,否则误差大,测量结果难以接受,此种情况下必须对水深测量结果进行改正。

## 2. 水深改正

目前,国内外学者关于水深改正的研究大致有以下几种方法[1]:加权平均声速法、经验声速法、泰勒级数展开法、等效声速剖面法、神经网络法、有效声速法、声线跟踪法等。其中加权平均声速法、经验声速法、泰勒级数展开法、等效声速剖面法模型比较简单,计算效率较高,但在大入射角的情况下适用性不好;声线跟踪理论严密,计算复杂,改正效果较好。

本文拟用以下两种改正方法进行改正比较,一种为基于层内常梯度( $g \neq 0$ )下的声线跟踪、另一种为 Hypack 软件提供的声速改正方法。

### 1) 基于层内常梯度( $g \neq 0$ )下的声线跟踪声速改正[2]

假设波束经历由  $N$  个不同介质层组成的水柱,声速在各层中以常梯度  $g_i$  变化。

设层  $i$  上、下界面处的深度分别为  $d_i$  和  $d_{i+1}$ ,声速分别为  $C_i$  和  $C_{i+1}$ ,层厚度为  $\Delta d_i$  ( $\Delta d_i = d_{i+1} - d_i$ ):波束在每层入射角度为  $\theta_i$ ,声波在层内实际传播轨迹为一连续的、带有一定曲率半径  $R_i$  的弧度,曲率半径为:

$$R_i = -\frac{1}{pg_i} \quad (1)$$

式中:  $p$  为 Snell 常数,  $p = \sin \theta_i / C_i$ 。

层  $i$  内声线的水平位移  $y_i$  为:

$$y_i = R_i (\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i) = \frac{\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}}{pg_i} \quad (2)$$

$$\cos \theta_i = \left(1 - (pC_i)^2\right)^{1/2} \quad (3)$$

波束在该层经历的弧段长度  $S_i = R_i (\theta_i - \theta_{i+1})$ ,则经历该段的水平位移  $y_i$  和时间  $t_i$  为:

$$y_i = \frac{\left(1 - (pC_i)^2\right)^{1/2} - \left(1 - p^2 (C_i + g_i \Delta d_i)^2\right)^{1/2}}{pg_i} \quad (4)$$

$$t_i = \frac{R_i (\theta_i - \theta_{i+1})}{C_{Hi}} = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{pg_i^2 \Delta d_i} \ln \frac{C_{i+1}}{C_i} \quad (5)$$

$$= \frac{\arcsin(p(C_i + g_i \Delta d_i)) - \arcsin(pC_i)}{pg_i^2 \Delta d_i} \ln \left(1 + \frac{g_i \Delta d_i}{C_i}\right)$$

式中:层内传播时间采用了 Harmonic 平均声速  $C_{Hi}$  代替,  $C_{Hi} = \frac{z - z_0}{t} = (z - z_0) \left[ \int_{z_0}^z \frac{dz}{C(z)} \right]^{-1}$ ,  $z$  为各声速分层所处深度,  $C(z)$  为水深  $z$  处实测声速。

### 2) Hypack 软件提供声速改正

Hypack 软件除了具备强大的测量成图系统功能外,还提供大地测量转换、测量设计、数据采集、数据后处理直到最终测量成图等功能,是目前世界上测量、疏浚行业应用最为广泛的一种应用软件。其数据后处理模块中实现了声速改正,但具体采用的改正方法在说明文档中未指明。

### 3. 水深改正方法分析

#### 3.1. 实测声速

当惹雍错位于西藏那曲地区尼玛县境内,距离尼玛县城约 72 km,该湖平均含盐度 9.4 g/L,平均水位 4500 m,水面面积约为 780 km<sup>2</sup>,测量过程中每日采用 SV-PLUS V2 声速剖面仪实测声速剖面。当惹雍错位于一个深陷的湖盆底部,从东北向西南延伸,湖区除表层外声速较为稳定,但水下声速相差较大,2015 年 6 月 25 日用声速剖面仪获取当惹雍错声速数据,由实测声速剖面(图 2)可以看出水表与水底声速相差 29.5 m/s,不同深度的水体中声速差别也较大,且在水深约 70 m 处存在跃层;2018 年 8 月 22 日、2019 年 8 月 10 日,采用声速剖面仪获取格仁错、普莫雍错声速分层数据,水体中分层声速相差较大,表层与水底声速相差分别为 32.6 m/s、15.3 m/s [3] [4]。

如果当惹雍错采用表层声速测深将不具代表性,测量的水深值也将存在较大误差,因此采用标准声速(1500 m/s)测深,后期根据实测声速剖面进行水深改正正是准确测量水深、计算湖泊容积的可行方法[5]。

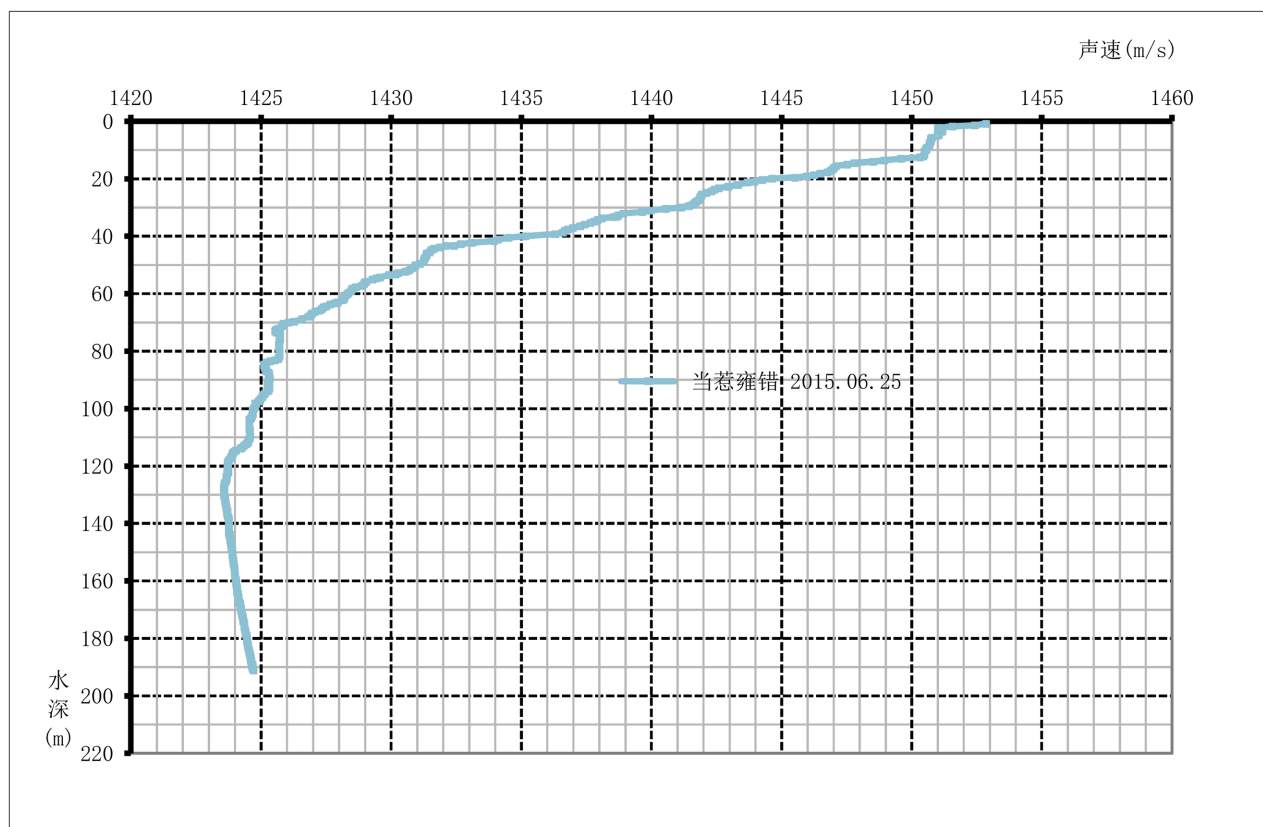


Figure 2. Measured sound velocity profile

图 2. 实测声速剖面图

#### 3.2. 改正分析

实测声速采用约 0.5 m 分层采样,数据采集较密,现以 10 m 为间隔、选择 10~190 m 不同深度目标进行水深测量(采用声速为 1500 m/s),并进行水深改正计算、比较[6]。其中回声仪实测水深采用 1500 m/s 声速测量;声速改正所应用的声速剖面由仪器实测,分别采用层内常梯度下的声线跟踪水深改正和 Hypack 软件改正。

层内常梯度声线跟踪水深改正过程如下:

- 1) 根据测深仪换能器入水深度、实测水深、采用声速(1500 m/s)计算声波由水面至水底传播所用总时间  $t$ ;
- 2) 水深改正第一层计算: 自测深仪换能器开始计算声波在第一层传播(声速在层内常梯度变化)所用时间  $t_1$ , 声波偏移距离  $y_1$  (用于计算波束脚印位置);
- 3) 逐层跟踪: 计算声波在第 2 层水体中传播所用时间  $t_2$  及偏移距离  $y_2$ ; 累加传播时间  $\sum t_2$  并与总时间  $t$  进行比较, 确保  $\sum t_2 < t$ , 即保证声波未到达水体底部, 仍在水体中传播; 依次计算第 3, 4, 5……,  $i-1$  层声波传播用时、偏移距离并累加  $\sum t_{i-1}$ 、 $\sum y_{i-1}$ ;
- 4) 水体底部的确定: 经跟踪声线在各层水体中的传播, 当  $\sum t_i = t$  时, 表明声波正好传播至水体底部, 此时声波所处深度  $d_i$  即为正确的水深(经层内常梯度声线跟踪水深改正); 实际跟踪的过程中很难遇到跟踪计算  $i$  层后正好  $\sum t_i = t$ , 多为  $\sum t_{i-1} < t$ ,  $\sum t_{i-1} > t$  情况出现, 此时说明声波未完全穿透第  $i$  层水体就应结束跟踪, 根据时间  $t - \sum t_{i-1}$  确定声波在第  $i$  层水体中传播的具体时间, 并计算声波在第  $i$  层内传播深度  $\Delta d'_i$  及偏移距离  $y'_i$ 。
- 5) 计算改正量: 改正水深为  $d_{i-1} + \Delta d'_i$ , 偏移距离为  $\sum y_{i-1} + y'_i$ 。

**Table 1.** Calculation of water depth correction  
**表 1.** 水深改正计算

目标深度(m)	测深仪实测水深 (1500 m/s)	改正水深 (利用实测声速改正)		真实水深
		层内常梯度下的声线 跟踪声速改正水深(m)	Hypack 软件改正水深(m)	
9.90	10.23	9.92	9.90	
19.95	20.64	19.97	19.95	
29.95	31.06	29.99	29.96	
39.95	41.47	39.97	39.94	
50.00	52.02	50.04	50.01	
60.00	62.56	60.09	60.06	
70.00	73.03	70.05	70.02	
79.90	83.41	79.92	79.89	
89.90	93.96	89.94	89.91	
99.90	104.48	99.94	99.91	
110.10	115.23	110.15	110.12	
119.90	125.55	119.94	119.91	
129.95	136.16	130.01	129.98	
140.20	146.94	140.25	140.22	
150.10	157.42	150.19	150.16	
160.00	167.86	160.10	160.07	
170.00	178.40	170.11	170.08	
180.30	189.25	180.41	180.38	
190.00	199.41	190.06	190.03	190.00

表 1 中测深仪实测水深(采用 1500 m/s 声速)水深误差较大, 当水深增大误差也随之增大, 主要是因为测量采用声速与实际湖区的声速差别太大导致; 层内常梯度下的声线跟踪水深改正和 Hypack 软件水深改正两种方式

改正后的水深值相差为最大为 3 cm, 两种方法改正效果好, 与目标深度相差大多在 0.1 m 以内, 相对误差小于 3‰, 完全满足规范要求测量限差[5], 也满足容积量算要求。测量期间每天测量距离超过 5 km 或测量时间超过 8 h 要用声速剖面仪取超声波声速两次, 2015 年 6 月 25 日, 通过绞车放声速剖面仪到湖底钢丝记号水深是 190.00 m, 验证了两种水深改正方法的正确性。

层内常梯度下的声线跟踪水深改正后的水深用于容积量算大大提高了容积精度, 按照平均水深推算, 当惹雍错最大水深改正量 10.72 m, 平均水深改正量为 4.90 m, 影响容积量 38.33 亿  $m^3$ , 这个误差相当于 2.5 个葛洲坝水库库容, 仅此一项改正计算可使湖泊容积量算减少 4.7% 的误差。色林错、格仁错、普莫雍错、塔若错、扎日南木错和羊卓雍错等湖均按此方法改正。

#### 4. 结论

水中超声波的声速直接影响水深测量, 进而影响到湖泊容积量算的精度。西部内陆湖泊大多水体中声速多变, 回声仪测深过程中一定不能忽视水中声速的变化, 不能仅用表层声速测量水深, 必须实测声速剖面数据进行后期水深改正。

水深改正技术是准确测深的有力保证, 层内常梯度下的声线跟踪水深改正和 Hypack 软件水深改正精度高, 两者差别小, 均可作为湖泊容积量算的首选, 可为后期西部重要湖泊测量提供技术参考。

#### 参考文献

- [1] 聂志喜, 王振杰, 李圣雪. 水下声学定位中声速改正方法的比较[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 423-427.  
NIE Zhixi, WANG Zhenjie and LI Shengxue. Comparison of sound speed correction methods in the underwater acoustic positioning. Marine Science Bulletin, 2015, 34(4): 423-427. (in Chinese)
- [2] 赵建虎. 现代海洋测绘(上册) [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.  
ZHAO Jianhu. Modern ocean mapping, volume one. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 水利部水文局. 西部部分重要湖泊测量报告[R]. 2015.  
Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources. Survey report of part important lakes in Western China. 2015. (in Chinese)
- [4] 张振军. 西部部分重要湖泊测深声速改正方法探讨[J]. 北京测绘, 2014(2): 39-40.  
ZHANG Zhenjun. Discussing on correction method for sound velocity of part western important lakes surveying water depth. Beijing Surveying and Mapping, 2014(2): 39-40. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国水利部. SL257-2000 水道观测规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL257-2000 specifications for waterway survey. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 聂金华. 深水水库测量最佳声速公式探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2016(6): 144-148.  
NIE Jinhua. Discussion of best sound velocity formula in deep reservoir measurement. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2016(6): 144-148. (in Chinese)