

# 水位库容曲线的卫星影像测定方法研究

陈 曦<sup>1</sup>, 裴 毅<sup>1</sup>, 姚 帮 松<sup>1</sup>, 汤 佳 浩<sup>1</sup>, 彭 浩<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学 工学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南省长沙县水利局, 湖南 长沙 410100)

**摘要:**水位库容曲线是水库运行管理的重要依据,由实地库区地形测量获得水位库容曲线的传统方法工作量大、限制条件多,对众多中小型水库来说,难以大量推广。以桐仁桥小水库为例,应用我国资源卫星影像资料,提取不同水位时的水库水面面积,结合实际水位记录数据,建立了水位-面积函数关系,运用积分方法推导了水位库容曲线。采用水量平衡法对推算结果进行了验证,并用数理统计法进行了精度分析。研究结果表明,运用卫星影像推求库容曲线的方法快捷、实用、精度可靠,具有很好的实际应用价值。

**关键词:**水位; 库容; 卫星影像; 水位库容曲线; 桐仁桥水库

中图法分类号: TV697 文献标志码: A

水库库容曲线是水库调度运行管理、大坝安全认定的重要依据,也是确定装机容量、大坝高度、泄洪设施运行正常、正常蓄水位、防洪限制水位等的重要依据,其精度直接影响到水库的发电、防洪、灌溉等效益<sup>[1-2]</sup>。目前,我国库容曲线的建立多依靠在水库蓄水前进行库区地形图测量,蓄水运行后则采用GPS定位与水深测量相结合的方式进行的量测<sup>[3-4]</sup>。这种实地地形测量方法需耗费大量时间和精力,并受到地形的限制。在现阶段我国的许多水库管理中,都存在库区相关水文资料不齐全、水库库容曲线精度不高甚至缺乏的问题,对水库科学调度管理、水资源合理利用产生了不利影响。

近年来,我国高分辨率资源卫星技术发展迅速,2007年9月19日,我国的CBERS-02B卫星成功入轨,搭载的分辨率为2.36 m的HR相机改变了国外高分辨率卫星数据长期垄断国内市场的局面<sup>[5]</sup>;2011年12月22日,成功发射的资源一号02C卫星更是配置了两台HR相机,大幅增加了数据覆盖能力并缩短了重访周期;2012年1月,资源三号卫星的成功入轨运行,进一步填补了我国立体测图这一领域的空白。高

分辨率卫星的应用满足了对小区域水资源进行定量监测的精度要求。本文尝试应用桐仁桥水库不同时期CBERS-02B、资源一号02C以及资源三号卫星高分辨率遥感影像,运用遥感技术和计算机技术方便、快捷地推求水库库容曲线,并对推求结果进行精度评价。

## 1 库区概况

桐仁桥水库位于湖南长沙县北部高桥镇,属于捞刀河流域,地处东经113°23'31.9"、北纬28°28'49.7",于1979年5月修建,是一座以灌溉、防洪为主,兼顾旅游开发等综合效益的中型水库。水库集雨面积15.5 km<sup>2</sup>,干流长6.8 km,平均坡降14.1‰,总库容1 897万 m<sup>3</sup>,主坝坝高30.3 m,灌溉面积18.13 km<sup>2</sup>。

库区所属流域为亚热带季风湿润气候区,春秋短促,冬夏绵长,冬寒夏热,四季分明。流域雨量充沛,多年平均降雨量1 445 mm,平均蒸发量1 362.59 mm,最大年降雨1 955.3 mm,最小年降雨1 018.2 mm。年内降雨量分配不均匀,1~3月占21.7%,4~7月占52%,12月份降水量仅为全年平均月降水量的3.2%。多年平均地表径度流深550~850 mm,相对湿度

收稿日期:2013-06-22

基金项目:国际科技合作专项(2013DFG91190);国家科技支撑计划项目(2012BAC09B04)

作者简介:陈 曦,女,硕士研究生,研究方向为农田水利。E-mail:pei yi@hunau.net

80%, 风速为 2.4 m/s。

## 2 遥感影像中水域面积的提取

本研究中,在资源卫星应用中心下载了覆盖桐仁桥水库的遥感影像共 13 幅,其中,CEERS-02B 卫星影像 6 幅,资源一号 02C 卫星影像 4 幅,资源三号卫星影像 3 幅,空间分辨为 2.1, 2.36 m。与水位历史记录数据对照可知,收集到的不同时相影像对应的水位在 91.43 ~ 97.90 m 之间。

我国资源卫星数据格式为 GeoTIFF,具有很好的兼容性,能被许多图像处理软件读入、转换和处理操作。本文运用美国 ERDAS 公司开发的遥感图像处理系统 ERDAS IMAGINE 对下载的遥感影像进行读取、裁切、增强处理、监督分类<sup>[6]</sup>、水体面积提取(图 1),得到不同时相桐仁桥水库水面面积,对比当时水位记录资料,得出面积-水位关系如表 1 所示。

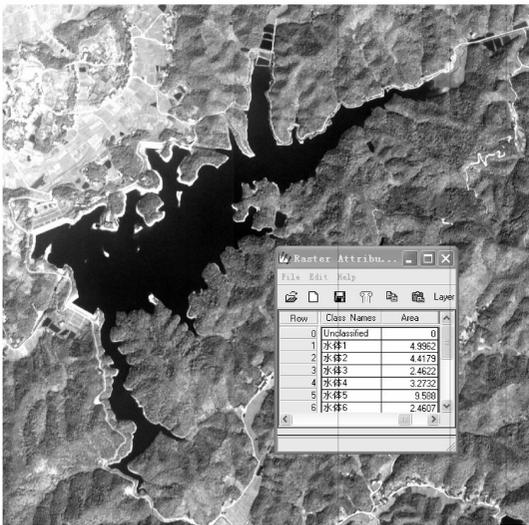


图 1 提取的水面信息

表 1 桐仁桥水库时间-面积-水位关系

日期/ (年-月-日)	面积/ 万 m <sup>2</sup>	水位/ m	日期/ (年-月-日)	面积/ 万 m <sup>2</sup>	水位/ m
13-04-06	110.86	95.68	09-09-22	91.29	92.08
13-03-18	106.73	95.06	09-09-14	93.70	92.58
12-12-24	94.83	92.81	08-10-16	89.42	91.80
12-10-11	95.18	92.66	08-09-17	91.62	92.15
12-09-05	102.43	94.40	08-08-22	104.87	94.90
12-07-12	120.63	97.90	08-03-19	88.13	91.43
12-06-15	115.4	97.08			

## 3 库容曲线推求

### 3.1 水面面积-水位函数推求

推求库容曲线的前提是要先建立水面面积与水位

的函数关系,而水面面积-水位函数与实际面积-水位函数的逼近程度直接决定了水库库容计算的精度。

本文根据表 1 中的数据,利用 Origin 软件,分别试用二阶多项式、三次多项式、对数函数 3 种函数拟合水面面积与水位关系,得到如下函数式。

$$S = f(h) = -0.0116h^2 + 7.1731h - 470.77$$

$$91.43\text{m} < h < 97.90\text{m} \quad (1)$$

$$S = f(h) = 0.0162h^3 - 4.6043h^2 + 441.99h - 14189$$

$$91.43\text{m} < h < 97.90\text{m} \quad (2)$$

$$S = f(h) = 470.37\ln h - 2036$$

$$91.43\text{m} < h < 97.90\text{m} \quad (3)$$

式中,  $S$  为水面面积;  $h$  为水位高程。

判定系数  $R^2$  是测定回归方程拟合优度的指标<sup>[7]</sup>,其取值范围为 0 ~ 1,  $R^2$  越接近 1, 表示相关的方程式拟合程度越高,判定系数为 1 表示回归方程和数据点完全拟合。判定系数  $R^2$  计算公式为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中,  $y_i$  为实际量取的面积,  $\hat{y}_i$  为通过拟合公式计算的面积,  $\bar{y}$  为平均面积。

对应式(1)、(2)、(3)计算的判定系数  $R^2$  分别为 0.998 1, 0.998, 0.996。

由此可知,式(1)拟合优度最好且运算最便捷且能很好反映两者之间的关系。

### 3.2 库容-水位函数推求

根据水面面积-水位关系,推求库容的方法通常有等高距梯形公式法、等高距棱台公式法。梯形公式法适合库区形态狭长的水库,棱台公式法适合库区形态宽阔的水库<sup>[8]</sup>。这两种方法的精度均受库区的形态以及等高距大小的限制,并且计算繁琐。

由于库容是随水位升高的单调递增函数,本文应用微积分原理,克服以上限制,推求出库容曲线方程。

对式(1)求积分可得库容-水位函数关系式为

$$V = F(h) = \int f(h) dh = \int (-0.0116h^2 + 7.1731h - 470.77) dh = -0.003867h^3 + 3.58655h^2 - 470.77h + C$$

$$91.43 \text{ m} < h < 97.90 \text{ m} \quad (5)$$

式中,  $V$  为蓄水量;  $h$  为水位高程。

为求得常数  $C$ , 本文选择多组 2004 年水库除险加固时勘测的水库水位、库容值代入式(5)计算相应的  $C$  值(表 2),再用最小二乘法求得最优  $C$  值,得  $C = 16839.08$ 。

表 2 参考 C 值

水位/ m	库容/ 万 m <sup>3</sup>	C	水位/ m	库容/ 万 m <sup>3</sup>	C
92.5	916	16835.36	95.5	1223	16839.40
94.0	1064	16837.39	97.0	1396	16844.15

### 3.3 绘制水位 - 库容关系

将实测水位代入式(5)可得到桐仁桥水库水位 - 库容关系,见表 3。

表 3 水位 - 库容关系

日期/ (年-月-日)	水位/ m	库容/ 万 m <sup>3</sup>	日期/ (年-月-日)	水位/ m	库容/ 万 m <sup>3</sup>
13-04-06	95.68	1242.29	09-09-22	92.08	880.91
13-03-18	95.06	1175.44	09-09-14	92.58	927.22
12-12-24	92.81	948.94	08-10-16	91.80	855.52
12-10-11	92.66	934.75	08-09-17	92.15	887.31
12-09-05	94.40	1106.38	08-08-22	94.90	1158.50
12-07-12	97.90	1497.20	08-03-19	91.43	822.58
12-06-15	97.08	1400.22			

依据表 3 水位 - 库容关系表绘制水位 - 库容曲线如图 2 所示。

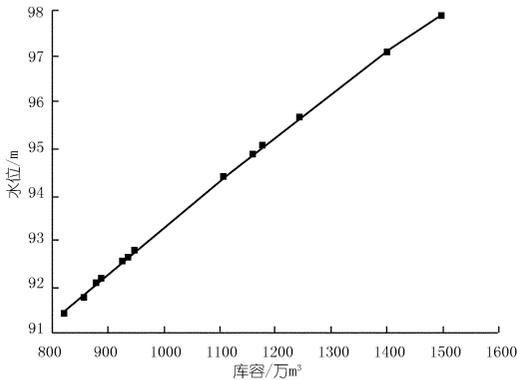


图 2 水库库容曲线

## 4 结果评价

### 4.1 水量平衡还原法检验

水库任意时段进入的水量与流出的水量差额等于该时段内蓄水的变化量,其关系为:

$$\Delta V = V_{\text{始}} - V_{\text{末}} = W_{\text{进}} + W_{\text{雨}} - W_{\text{蒸}} - W_{\text{渗}} - W_{\text{出}} \quad (6)$$

式中,  $\Delta V$  为时段末库容变量;  $V_{\text{始}}、V_{\text{末}}$  为时段始、末库容;  $W_{\text{进}}$  为时段内的进库水量;  $W_{\text{雨}}$  为时段内水库水面降雨形成的增加水量;  $W_{\text{蒸}}$  为时段内库面蒸发水量;  $W_{\text{渗}}$  为时段内库区渗漏水量;  $W_{\text{出}}$  为时段内水库泄水量。

根据库容曲线可以推求不同水位区间的库容变量,即一定时段内的蓄水变化量。将其代入水量平衡

公式,复核其与时段内实测的蓄水变化量是否相等,可以判断新推求出的库容曲线的合理性。

选择 2005 年 10 月至 2006 年 3 月桐仁桥水库的资料进行结果检验。该时段内,水库关闸蓄水,泄水量为零;水面蒸发及渗漏损失水量很小,可以忽略不计。参照库区附近螺岭桥水文站历年径流、降雨资料,推求桐仁桥水库库区流域产生的径流量以及降雨量,即可求出该时段内水库蓄水量的变化量。假定计算开始时段的库容为零,求得水位与蓄水变化量关系如表 4。

表 4 水位 - 蓄水增量关系

时间/ (年-月)	库水位/ m	蓄水变化 量/万 m <sup>3</sup>	时间/ (年-月)	库水位/ m	蓄水变化 量/万 m <sup>3</sup>
2005-10	91.10	96.74	2006-01	92.92	32.61
2005-11	91.98	83.52	2006-02	95.64	281.3
2005-12	92.61	60.46	2006-03	96.34	82.62

将月末水位值代入式(5),求得与水位差对应的库容增量关系:库水位 91.10 ~ 91.98 m 库容增量为 78.01 万 m<sup>3</sup>; 91.98 ~ 92.61 m 库容增量为 58.28 万 m<sup>3</sup>; 92.61 ~ 92.92 m 库容增量为 29.39 万 m<sup>3</sup>; 92.92 ~ 95.64 m 库容增量为 278.49 万 m<sup>3</sup>; 95.64 ~ 96.34 m 库容增量为 77.62 万 m<sup>3</sup>。

比较蓄水变化量与库容增量,运用统计检验法,选取数理统计方法中的均方根百分误差  $RMSP$ 、相关系数  $r$  以及希尔不等式系数  $U$ ,3 种检验指标对蓄水变化量与库容增量之间的一致性进行定量分析。当  $RMSP < 15\%$ ,  $r > 0.8$ ,  $U < 0.3$  时,则表示两组数据差值在允许范围内。以  $x$  表示蓄水变化量,以  $y$  表示库容增量,计算如下:

① 均方根百分误差为

$$RMSP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} = 6.73\% < 15\%$$

② 相关系数  $r$  为

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} = 0.999 > 0.8$$

③ 希尔不等式系数  $U$  为

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}} = 0.014 < 0.3$$

由上述计算结果可知,蓄水变化量与库容增量的差值在有效区间内,推求的库容曲线符合水库实际情况。

## 4.2 与建库时的历史库容曲线比较

由图3可以看出,推求的库容曲线与原库容曲线线形一致并且非常接近,验证了推求的库容曲线合理性。推求出的库容曲线与原始记录有所偏差的原因可能有:①桐仁桥水库从建成至今已经运行30多年,多年的泥沙淤积使得库容曲线发生变化;②水库遥感影像监督分类处理、提取水域面积时存在一定的误差;③由水位-水面面积有限离散数据拟合的函数与实际水位-面积关系存在一定的误差。

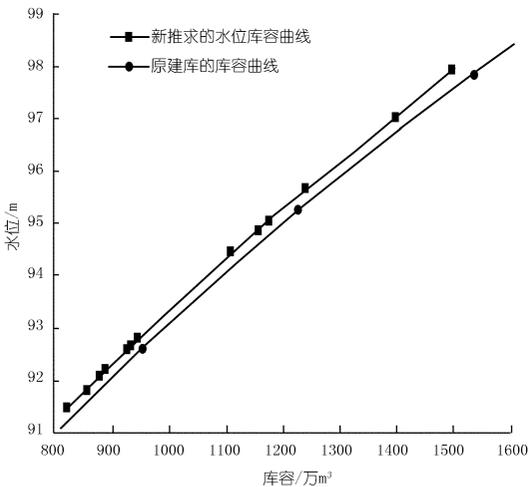


图3 新推求库容曲线与原建库时库容曲线对比

## 5 结语

本文应用我国高分辨率卫星影像资料获取了桐仁桥水库不同时期的水面面积,与水位资料一起,采用计

算软件及积分方法计算推求库容曲线,该方法便捷、可实施性强。经数理统计方法验算,推求结果的百分误差、相关系数以及希尔不等式系数3种检验指标均在误差允许范围内,精度满足作为作为水库调蓄运行管理依据的需求,能够实现科学、安全管理水库,经济、高效利用水资源提供可靠的支持。该方法避免了繁重的库区水下地形测量工作,能够在不影响水库运行管理的情况下,经济、轻松、快捷地推求出库容曲线,该方法的推广应用可补充我国部分水库库容曲线资料,提高水库的运行管理水平。

## 参考文献:

- [1] 王成,曹庆磊. 水库运行管理中优化调度的计算机算法研究[J]. 长江科学院学报,2011,28(1):66-70.
- [2] 高圣益,李成国. 水库库容测量技术研究[J]. 人民长江,2007,10(38):98-99.
- [3] 马文祥. 基于GIS的中小水库地形和库容测量实践[J]. 测绘通报,2006,(8):66-68.
- [4] 徐英良. 茅子沟水库库容曲线测量与计算初探[J]. 商品与质量学术观察,2011,(10):87.
- [5] 廖安平,刘良明,叶沅鑫,等. CBERS-02B星HR数据几何纠正模型研究[J]. 遥感信息,2010,(4):63-67.
- [6] 袁金国. 遥感图像数字处理[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [7] 赵松山. 对拟合优度 $R^2$ 的影响因素分析与评价[J]. 东北财经大学学报,2003,(3):56-58.
- [8] 卢彤. 水库库容测量与计算精度研究[J]. 山西水利,2007,(2):98-99.

(编辑:常汉生)

## Research on determination method of reservoir level - capacity curve by satellite imagine

CHEN Xi<sup>1</sup>, PEI Yi<sup>1</sup>, YAO Bangsong<sup>1</sup>, TANG Jiahao<sup>1</sup>, PENG Hao<sup>2</sup>

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Water Authorities of Changsha County, Changsha 410100, China)

**Abstract:** Reservoir level - capacity curve is an important basis for reservoir's operation and management. The traditional determination method for level - capacity curve by field measurement in a reservoir area is characterized by large workload, multiple limitations, and it is difficult to be extensively promoted for a large number of middle and small reservoirs. In this paper, taking Tongrenqiao Reservoir as an example, firstly, the water surface area of the reservoir was abstracted using the imagines of resource satellite of China and the function relation of reservoir water level - surface area was established in combination of measured water level data; and then, the reservoir level - capacity curve was obtained by integration method. The obtained reservoir level - capacity curve was verified by water balance method and the accuracy was analyzed by mathematical statistics method. The research results show that the determination of reservoir level - capacity curve by satellite imagines is quick, applicable, reliable and is worth to promotion and application.

**Key words:** water level; reservoir level - capacity curve; satellite imagine; reservoir level - capacity curve; Tongrenqiao Reservoir