引文格式：杨博, 曹南, 杨新海, 等. 双曲拱坝体型误差自动化获取方案研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(4): 93-95. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.04.023

双曲拱坝体型误差自动化获取方案研究

杨　博[1]，曹　南[1]，杨新海[1]，蔡扬扬[1]
（1. 自然资源部第一地形测量队，陕西 西安 710054）

摘　要：双曲拱坝是近几年来兴起的一项筑坝技术[1]。由于其在竖直和水平两个方向均为曲线[2]，常规测量方法难以准确获取体型误差；同时在施工过程中，体型误差作为衡量施工结果的重要依据必须现场得出，对作业人员提出了更高的技术要求。针对这一问题，设计了一套体型误差获取方法，然后将算法移植到安卓平台上，实现体型误差的自动化获取，并将成果应用于三河口水利枢纽大坝体型控制作业。此方案摆脱了常规方法的束缚，计算结果可靠，节省了人力、物力和时间，有效提高了工作效率。

关键词：双曲拱坝；体型误差；安卓；自动化获取
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）04-0093-03

Research on Automatic Acquisition Scheme of Shape Error of Double Curved Arch Dam

YANG Bo[1], CAO Nan[1], YANG Xinhai[1], CAI Yangyang[1]
(1. The First Topographic Surveying Brigade of MNR, Xi'an 710054, China)

Abstract: Doublecurved arch dam is an emerging dam construction technology in recent years. However, Double curved arch dam is curved in both vertical plane and horizontal plane, so it is difficult to accurately obtain the shape error by conventional measurement methods. At the same time, in the construction process, the shape error as an important basis for measuring the construction results must be obtained on-site, which puts forward higher requirements for the shape control. Based on the design principle of double curved arch dam, we designeda set of shape error calculation method for rolling parabolic double curved arch dam. At the same time, taking advantage of the portability of Android smart phones, we developed a set of body shape error calculation tool, which could calculate the body shape error at any time and anywhere through arbitrary observation data.This method can getrid of the shackles of conventional calculator programming and greatly improve the work efficiency.

Key words: double curved arch dam, shape error, Android, automatic acquisition

双曲拱坝是指双向（水平及竖直）弯曲的拱坝，是拱坝中最具代表性的坝型[3]。拱坝的体型误差是指在拱坝施工期间及建成后监测阶段，任意测得的拱坝体型边界坐标与理论设计值之间的差异。拱坝体型误差的大小决定了拱坝实际边界的变形量[4]，对施工结果及后期运营阶段的变形监测具有重要的参考意义。由于拱坝设计的复杂性，自动化获取并记录拱坝的体型误差一直是拱坝体型控制的难点[5]。目前是在工程计算器中编制运算程序，但存在程序录入复杂、不能调整坝型参数、所得结果无法记录、体型误差无法直接得出等诸多问题，且对施工人员要求较高，无法在现场直接指导施工作业。通过研究拱坝数学模型[6]，提出体型误差获取方法，并移植于移动设备上，实现自动化实时处理，形成解决拱坝体型误差控制的一整套工作流程。

1　双曲拱坝体型误差算法建立

1.1　拱坝坐标系统建立

取双曲拱坝上游面顶拱拱冠梁处为坐标原点 O，Y 轴方向为拱冠梁指向下游面，X 轴方向为垂直于 Y 轴指向于拱坝左岸，Z 轴方向竖直向下，建立拱坝的施工坐标系[7]。

1.2　拱坝体型误差算法建立

双曲拱坝的体型误差为其水平拱圈内实测坝面坐标 P 与理论值坝面坐标 P_0 之间的水平距离 δ。由双曲拱坝（抛物线型）参数化建模[8]可知，在高程确定的情况下，其水平拱圈中心线曲率半径 R_c、中心线拱冠梁处 y 坐标 y_c 均为定值[9]，这样就将体型误差从三维空间降至平面内几何误差即可解决。在计算实测点的拱坝体型误差时，通过 x，y 两个方向控制误差

收稿日期：2021-11-16；修回日期：2021-12-30。
项目来源：江西省自然科学基金资金项目（20202BAB212014）。
第一作者简介：杨博（1990—），工程师，主要研究方向为工程测量，E-mail：www.ncaa.cn@qq.com。

容易导致水平拱圈线条不平顺，可将 x，y 两个方向误差直接转化为实测点至水平拱圈中心线间直线距离，减去一半水平拱圈厚度[10]，即

$$\delta = D - \frac{T}{2} \tag{1}$$

式中，D 为实测点 P（x_0，y_0）至水平拱圈中心线的直线距离；T 为水平拱圈厚度。

取 P_1 为实测点 P 在水平拱圈切点，其点坐标为 $P_1(x_1, y_1)$，水平拱圈中心线方程为[11-12]：

$$y_1 = y_c + \frac{x_1^2}{2R_c} \tag{2}$$

通过 $P(x_0, y_0, z_0)$ 点水平拱圈中心线法线斜率为 $k = -\frac{R_c}{x_1}$，实测点 P 在通过 P_1 点的法线上，有：

$$y_1 - y_0 = -\frac{R_c}{x_1}(x_1 - x_0) \tag{3}$$

将式（2）代入式（3），可得：

$$y_c + \frac{x_1^2}{2R_c} - y_0 = -\frac{R_c}{x_1}(x_1 - x_0) \tag{4}$$

式（4）变换可转化为关于 x_1 的特殊一元三次方程：

$$x_1^3 + px_1 + q = 0 \tag{5}$$

其中：$\begin{cases} p = 2 \times R_c \times (R_c + y_c - y_0) \\ q = -2 \times R_c^2 \times x_0 \end{cases}$，根据卡尔丹公式可得方程唯一解：

$$x_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \tag{6}$$

将 x_1 代入式（2）可得 P_1 点坐标 (x_1, y_1)，则实测点 P 与 P_1 之间距离 D 为：

$$D = L_{pp_1} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \tag{7}$$

当 $\delta > 0$ 时，表示实测点 P 位于水平拱圈外侧，双曲拱坝在水平面内超出理论浇筑值；当 $\delta < 0$ 时，表示实测点 P 位于水平拱圈内侧，双曲拱坝在水平面内不足理论浇筑值。

2 体型误差自动化处理方案

2.1 体型误差计算算法流程

体型误差计算首先输入实测坐标（x_0，y_0，z），根据输入坐标 z 值计算实测坐标在 z 高度水平拱圈中心线曲率半径 R_c，再基于算法根据实测坐标计算其理论值 P_1 点坐标（x_1，y_1），计算 $P-P_1$ 之间距离 D 及 P_1 处拱坝厚度 T，然后基于实测坐标（x_0，y_0）和理论坐标（x_1，y_1）以及固定误差（测量挡板厚度值）和水平拱圈厚度 T 按式（1）求解体型偏差值。若测段未完成，则重新输入实测坐标进行计算；若测段已完成，计算测段中误差并进行精度评定。

2.2 基于安卓的软件设计

在拱坝浇筑施工阶段针对拱坝的浇筑结果，需要现场自动化得出拱坝体型误差及其中误差，以现场快速调整拱坝浇筑偏差；同时在浇筑和后期运营监测过程中，由于工作需要，需快速实现施工坐标和地理坐标之间的坐标转换以及快速实现方位角计算。

软件基于安卓平台[13]使用Java语言进行开发。采用Eclipse Mars软件开发平台，使用JDK 1.8的java开发工具包，Android SDK Platform 23.0.6的android开发工具包，软件可运行在Android7.0以下版本的移动设备上。

3 应 用

考虑到不同高程面水平拱圈中心线曲率半径 R_c、中心线拱冠梁处 y 坐标 y_c 不同，试验选取8组不同高程面的大坝体型边界测量数据，如表1所示，通过双曲拱坝体型边界上同一点实际施工中工程计算器计算的体型误差与本工具计算的体型误差进行对比，来验证本工具对于拱坝体型控制的有效性。

通过表1可知，利用传统工程计算器计算的体型误差与本工具获取的体型误差相一致，仅存在微小差异。根据SL 52-2015《水利水电工程施工测量规范》[14]可知，混凝土水工建筑物平面点位中误差不超过±20 mm，

表1 双曲拱坝同一点体型误差对比表

点号	X /m	Y /m	Z /m	计算器体型误差/mm	本工具体型误差/mm	互差/mm
1	3 690 614.497	504 426.787	512.052	5.2	5.1	0.1
2	3 690 556.976	504 468.031	534.067	8.0	8.6	0.6
3	3 690 596.811	504 402.737	541.052	0.4	0.5	0.1
4	3 690 609.956	504 388.564	555.548	6.1	6.3	0.2
5	3 690 592.152	504 450.142	567.283	−2.9	−3.2	0.3
6	3 690 589.558	504 451.352	573.359	5.1	5.3	0.2
7	3 690 631.180	504 352.036	576.672	1.2	1.8	0.6
8	3 690 521.743	504 453.306	580.010	3.7	3.7	0

而本工具与传统工程计算器相比，在体型误差控制上能精度能控制在1 mm以内，远远满足设计要求，故而在双曲拱坝体型控制方面，本工具计算结果是可靠的。

4　结　语

根据本文设计的双曲拱坝体型误差自动化获取方案，针对抛物线型双曲拱坝，总结了一套体型误差计算方法，并将此方法植入基于安卓系统的移动设备，能够根据现场测量结果，实时获取体型误差结果，相对于传统的使用工程计算器编程的方法，实现了无延迟现场作业及测量后成果自动记录导出，可迅速在工作区内推广。通过在三河口水利枢纽双曲拱坝上的应用，证明其算法可靠，方案设计科学，可为前期施工和后期成果验收提供理论依据。在以后的拱坝测量工作中，还可以对其进行改进、完善，使其发挥更大的作用。

参考文献

[1] 雒少江. 碾压混凝土双曲拱坝施工技术的研究与应用[D]. 西安:长安大学,2017

[2] 王心勇. 基于有限元法的双曲拱坝体形优化设计[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2006

[3] Conference Report: International Symposium on RCC Dams[R]. Water Power and Dam Construction,1992

[4] 李一兵,吴德金. 提高双曲拱坝测设精度的简易方法[J]. 测绘信息与工程,2000,2(1):5-7

[5] 王晨阳. 解析混凝土抛物线双曲拱坝的施工放样[J]. 智能城市,2018,4(4):124-125

[6] Abdulrazeg N, Jaafar K M. Thermal and Structural Analysis of RCC Double-curvature Arch Dam[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2014,20(3):434-445

[7] 郭菁,詹平,欧阳建国. 抛物线双曲拱坝计算[J]. 工程图学学报,2003,1(1):93-100

[8] 李博. 星形线双曲拱坝体型建模与有限元分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2017

[9] 王栋,李守义,曹蔚. 基于有限元的拱坝体形优化设计[D]. 西安:西安理工大学,2005

[10] 王平,陈渝. 水利枢纽双曲拱坝体型控制测量[J]. 水电站设计,2018,34(2):58-65

[11] 穆国锋,辛晓涛,张韶华. 石门坎水电站双曲拱坝施工测量[J]. 云南水力发电,2011,27(6):152-156

[12] 赵艳,章青. 抛物线形双曲拱坝体型参数拟合及其在溪洛渡工程中的应用[J]. 水电站设计,2007,23(2):18-21

[13] 杨丰盛. Android应用开发揭秘[M]. 北京:机械工业出版社,2010

[14] 水利水电工程施工测量规范: SL 52-2015[S].

(上接第77页)

亩，其中深松作业面积608.52万亩、秸秆粉碎还田作业面积684.91万亩、植保作业面积809.08万亩、油菜直播作业面积66.44万亩。依托平台数据各相关部门累计发放深松作业、秸秆粉碎还田作业、油菜机直播作业等各类作业补贴3亿多元。

4　结　语

基于北斗的高精度位置服务平台依托中国第二代卫星导航系统科技重大专项、湖北省北斗导航应用示范重大专项，打破了国外进口软件平台技术垄断，研制了完全具有自主知识产权的北斗高精度位置服务平台，实现了在政府公共管理、现代气象预报、生态环境保护、交通运输管理、智慧城市建设、现代农业等多个国家重大工程领域中的成功应用[5-7]，彻底摆脱了国外平台对用户接入量限制、基准站接入量限制等各种技术封锁，全面践行了核心技术自主可控的国家战略。在抗击新冠肺炎疫情期间，平台持续为应急保障等疫情防控公共服务提供技术支撑，同时助力复工复产的各行各业用户，积极为武汉市和湖北省经济社会发展贡献力量。

参考文献

[1] 唐晓霏,孙小超,魏以宽,等. BDS高精度位置服务平台业务服务体系建设研究:以湖北省为例[J]. 北京测绘,2020,34(3):305-309

[2] 孙小超,唐晓霏,魏以宽,等. BDS可用性研究与验证[J]. 地理空间信息,2019,17(4):54-56

[3] 唐晓霏,车一鸣,孙小超,等. 北斗一张网业务管理与服务系统设计与实现[J]. 测绘通报,2020(1):142-145

[4] 赵鹏,孙小超,唐晓霏,等. 湖北省北斗高精度位置服务“一张网”建设研究[J]. 地理空间信息,2019,17(11):34-35

[5] 唐晓霏,孙小超,陈豪,等. 省级北斗地基增强系统建设与应用探讨[C]//卫星导航定位与北斗系统应用2018:深化北斗应用促进产业发展论文集,2018

[6] 张士柱,李莎莎,肖伟,等. 利用Multi-GNSS估计天顶对流层延迟[J]. 地理空间信息,2019,17(5):68-72

[7] 龚卉,魏以宽,唐晓霏,等. 省级地质灾害监测体系关键技术应用研究[J]. 地理空间信息,2020,18(3):27-30