

多源测控技术在尾矿库安全监管中的应用研究

Research on the Application of Multi-source Measurement and Control Technology in TSF Safety Regulation

娄仲凯^{1,2}

(1. 四川省安全科学技术研究院, 四川 成都 610000; 2. 重大危险源测控四川省重点实验室, 四川 成都 610000)

摘要:为提高尾矿库监管的可靠性和系统化水平,实现尾矿库数字化管控,提出将高分遥感、无人机和三维激光技术综合应用于尾矿库安全监管中,由此获取“空天地”多源数据的技术,并基于多源大数据建立尾矿库的重大风险源“健康档案”,实现全过程的精细化管控,开展诊断-分析-设计-治理(DADT)循环防控、全寿命周期的过程控制,实现对尾矿库全空间、多尺度的综合测控,克服了以往对尾矿库安全监管系统性的不足,有利于精确和高效的处理安全隐患,为尾矿库的安全监管提供了一种科学、高效、完整的新思路。

关键词:“空天地”多源数据; DADT; 尾矿库

中图分类号: TD926

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)01-0051-05

Abstract: To improve the reliability and systematization level of TSF regulation and enable a digital management and control of TSFs, this article has proposed a comprehensive application of high-resolution remote sensing, unmanned aerial vehicle and three-dimensional laser technology in TSF safety regulation, thus to obtain the “space-air-ground” multi-source data technology, and build a “health archive” for the major risk sources of TSFs based on the multi-source big data to fulfill a refined management and control of the whole process, and carry out the diagnosis-analysis-design-governance (DADT) cycle prevention and control, the process control of the whole life cycle, enabling a comprehensive measurement and control of the whole space and multi-scale of TSFs, having overcome the systematic deficiencies of the safety regulation of the TSFs existing in the past, and helped to accurately and efficiently deal with potential safety hazards, providing a scientific, efficient and complete new concept for the safety regulation of TSFs.

Key words: “space-air-ground” multi-source data; DADT; TSF

1 前言

尾矿库是重要的生产设施,同时从安全上来说也是重大的危险源。尾矿库一旦发生溃坝垮塌事故,将给社会稳定、人民生命财产及环境安全带来重大隐患。国内外对尾矿库的研究都集中在尾矿坝稳定性^[1-3]、尾矿坝抗震性能^[4]、尾矿坝安全保护措施^[5]、尾矿坝安全管理^[6]和尾矿坝安全监测等方面,并取得了可喜的成果。但是,尾矿库在安全测控方面仍有诸多问题没有解决,现有的监控系统普遍存在监测参数不全、扩展性和兼容性差以及缺乏故障在线诊断和处置专家系统等问题,系统不能够进

行故障的智能分析并提供可靠和及时的事事故预警,不能预防和控制重大事故的发生和发展。从预防、控制和消除事故,以及事故应急处理的角度,寻找新的尾矿库监测监控技术是势在必行的。

本文提出一种将高分遥感技术、无人机、三维激光扫描技术结合,综合获取“空天地”多源信息,并将其应用于尾矿库安全监测中的方法,对于提高企业的安全水平,实现尾矿库事故从灾后处置到灾前监测预警的转变,具有十分重要的意义。

2 多源测控技术简介

2.1 高分遥感技术

高分辨率影像通常指像素的分辨率在5 m内的遥感影像。早期的高分辨率传感器的研制与应用主要是在军事领域,以大比例尺遥感制图和对地物的分析和人类活动的监测为目的,20世纪90年代以后才逐渐进入商业和民用领域的范围,并迅速的发

[作者简介] 娄仲凯(1987-),男,硕士,工程师,安全工程专业,主要研究方向为矿山安全技术及工程。

[引用格式] 娄仲凯. 多源测控技术在尾矿库安全监管中的应用研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(1): 51-55.

展起来。与传统的低空间分辨率的卫星影像相比,高分辨率影像具有以下特点:(1)单幅影像的数据量显著增加;(2)成像光谱波段变窄;(3)地物的几何结构和纹理信息更加明显;(4)从二维信息到三维信息;(5)高空间分辨率。米级空间分辨率使尾矿库相关要素均可以在遥感图像上得到反映,可以根据尾矿库各种实体要素的遥感成像机理、影像特征提取相关信息。因此,高分辨率卫星遥感影像的出现使得较小空间尺度上观察地表的细节变化、监测人为活动对环境的影响成为可能。

2.2 无人机航测技术

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种机上无人驾驶的航空器,其具有动力装置和导航模块,在一定范围内靠无线电遥控设备或计算机预编程序自主控制飞行。一直以来,UAV的关键技术都掌握在军事领域,应用于战场侦察、作战效果、目标追踪与识别等。自从进入21世纪以来面对自然灾害、环境保护、资源勘探和安全监管等问题,各国政府已将UAV技术运用到自身领域,应对不断出现的难题和挑战。这使得越来越多的关键技术从研究开发发展到实际应用阶段,从军事领域发展到民用市场。民用UAV负载高清数码相机、数码摄录机、雷达发生器以及激光扫描仪等,如此高分辨率及高精度的影像获取和处理新技术,为安全监管提供了一种新的方式。而且在另一方面,随着基于光学原理的倾斜摄影测量技术的发展,UAV的飞行数据便不仅仅局限于高清的照片与视频等传统的数据形式,高精度的地表模型与高度仿真化的建筑模型也能够通过无人机技术进行构建。因此,无人机技术作为一项新兴的民用技术手段,鉴于其特有的空对地高效监测优势,便捷的区域性与精细化的地表三维建模能力,其必将成为解决安全监管问题的有效技术手段。

2.3 地面三维激光扫描技术

地面三维激光扫描技术诞生于20世纪末,被认为是GPS技术在测绘领域应用之后的一次革命性的技术发展。三维激光扫描技术被称为“实景复制技术”,其能快速获得原始的测绘数据,高精度完整地重建实体。该技术集光学、机械、电器控制和计算机技术于一体是从传统测绘计量技术经过精密的传感工艺整合及多种现代高科技手段集成而发展起来的,是对多种传统测绘技术的概括及一体化。它能直接从实体中快速采集三维数据并重建模型,无需

对实体表面进行任何处理,获得的激光点云数据都是直接采集目标的真实数据,这使得后期处理的数据完全真实可靠。利用它进行高效率、高质量、低成本的空间数据采集、处理,可以有效解决数字化信息采集的难题。而且,地面三维激光扫描技术使传统的人工单点数据获取变为连续自动获取批量数据,提高了量测的精度与速度。由于其能够实现高精度的面、体测量与重建,使得该技术在测绘监测、建筑设计和文物保护等方面有了很多的探索和应用,因此,具备高效、精准三维监测与建模的三维激光扫描技术也必将成为安全监管领域的有效手段。

3 多源测控技术的功能及数据处理

将高分遥感技术、无人机/三维激光扫描技术综合应用于尾矿库安全监测中,开创了“太空—低空—地表”多源信息综合获取和应用的先河。高分遥感技术解决了大范围、宽尺度的测控需求,对尾矿库灾害疑似点及周边情况进行宏观监测,并用于指导规划管理、灾害监测、应急救援、监察执法等。无人机/三维激光扫描技术解决了小区域、精细化的测控需求,对尾矿库堆排状况、灾害疑似点进行精确监测,并用于指导规划设计、日常管理、安全防控和灾害防治等。“太空—低空—地下”多源数据和信息的融合,并集成三维立体可视化、数字化监测、灾害风险动态模拟等关键技术,实现了尾矿库全空间、多尺度、矢量化快速综合测控,建立了科学、高效、完整的安全防控技术体系,具体如图1所示。

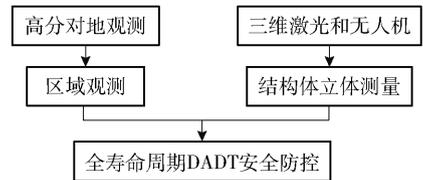


图1 空天地多源测控技术融合

3.1 高分遥感影像的功能及数据处理

借助高分辨遥感影像大范围、时空连续性的特点,往往能精确的对尾矿库位置及相关信息进行提取及动态分析。既能够满足尾矿库大范围监测的要求,也能够动态的监测尾矿库及其周边环境,从而提升尾矿库风险管理的水平及应急响应能力。

高分系列遥感卫星影像数据处理主要包括辐射定标、大气校正、正射校正、影像配准、图像融合、影像镶嵌及影像融合等处理流程,数据处理流程如图2所示。

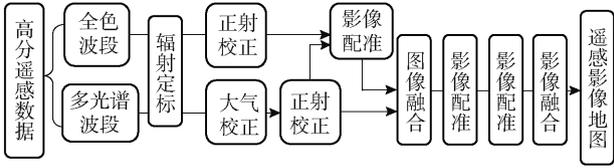


图2 高分影像地图处理流程

3.2 无人机、地面三维激光扫描技术的功能及数据处理

通过无人机和三维激光扫描仪,从地表获取尾矿库精确的三维实景场数据,按一定的规则形成全寿命周期健康档案。然后通过建立多次扫描数据档案,对比每一次的扫描结果,动态了解堆排情况、干滩水位的变化。以几何变形为基础,通过对三维数据场的诊断,在第一时间发现隐患,进而开展专业化的针对性分析,提出治理和防范措施。以此开展诊断-分析-设计-治理(DADT)循环防控的、全寿命周期的过程控制。具体而言,DADT循环管控技术主要内容阐述如下:诊断—diagnose,简称D,依据管控

对象全寿命周期健康档案的最新数据,结合相关安全技术标准、规程等,对管控对象进行全面、细致的危险有害因素“诊断”排查,旨在初步发现安全隐患问题;分析—analysis,简称A,针对“诊断”结果,通过专家会诊,耦合相关专业分析技术,找到安全隐患问题出现的原因、可能的影响后果等,旨在精确获取安全隐患的具体情况;设计—design,简称D,根据安全隐患得到的结论的基础上,提出可供解决隐患问题的思路、方法和措施,为安全隐患提供指导性方案设计;治理—treatment,简称T,依据设计提出的初步设计方案,经安全性、经济型和技术性比较之后,确定选择合适的设计方案,并进行细化,形成治理方案,实施安全隐患治理。若治理过程中,出现与设计不一样的结论,那就需要重新从“诊断”开始,继续进行DADT循环管控,直到问题得到彻底解决。

无人机航测的数据处理流程则分为3个部分:数据预处理、自动空三加密和地理信息测绘产品生产,具体如图3所示。

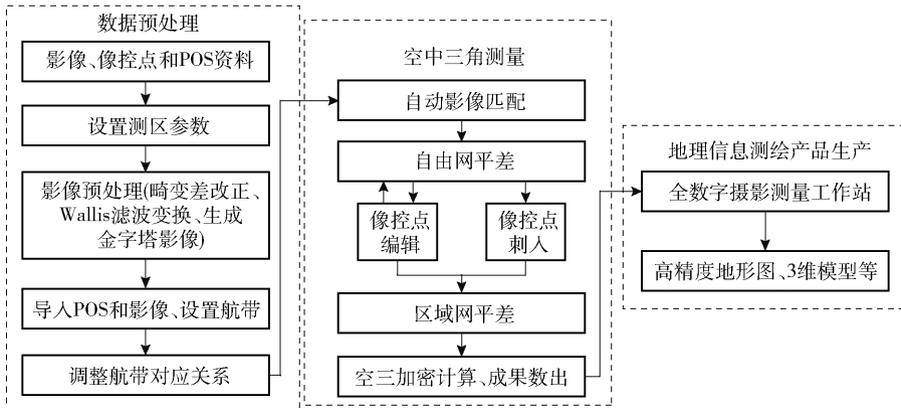


图3 无人机数据处理基础流程图

三维激光扫描数据处理包括原始点云的去噪、拼接、融合、着色和漏洞修复等处理步骤,其处理流程如图4所示。

4 案例应用

为了验证“空天地”多源测控技术在尾矿库安全监管中的有效性和适用性,选取攀西某二等尾矿库作为研究对象,通过现场勘查发现该尾矿库排洪系统行洪能力较小,调洪库容不足,要解决行洪能力不足的问题,通过多源测控技术结合调洪演算可精确指导企业解决安全隐患。

4.1 攀西某尾矿库基本情况

该尾矿库位于四川省攀枝花市米易县威龙州西侧,尾矿库初期坝为透水堆石坝,初期坝坝顶标高1 618.0 m,坝长320 m,最大坝高44 m,上下游坡比为1:2,下游在标高1 574 m、1 590 m和1 605 m设三条宽2.0 m的马道。堆积坝采用上游法尾矿砂筑坝

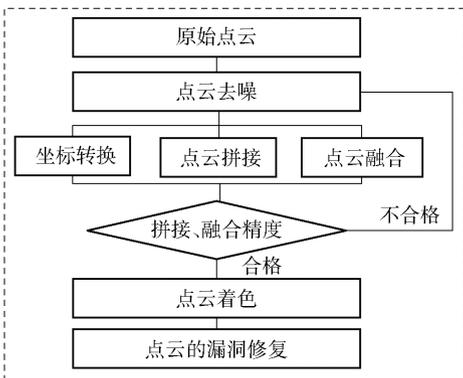


图4 三维激光扫描数据处理流程图

工艺,尾矿最终堆积标高 1 730 m,总坝高 156 m,总库容 2 295 万 m³,为二等尾矿库。

4.2 基于空天地多源测控技术的隐患治理

调洪演算以 500 年一遇洪水为例,洪水频率 $P=0.2\%$ 计算,运用高分影像获得地形参数,高分影像如图 5 所示,参数见表 1。



图 5 尾矿库高分影像

表 1 流域特征参数

汇水面积 F/km^2	主河槽长度 L/km	主河槽平均纵坡
4.954	4.142	0.137

洪水计算成果见表 2。

表 2 尾矿库洪水计算成果

$P/\%$	0.2
洪峰流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	72.7
洪水总量/ 万 m^3	107.3

根据三维激光扫描数据,对尾矿库进行建模,获取不同标高时尾矿库三维实体模型,具体如图 6 和图 7 所示,并且在满足最小干滩长度和最小澄清距离的前提下,可在三维实体模型上直接获取库内水面面积,进而获得尾矿坝不同标高时的调洪库容,见表 3。

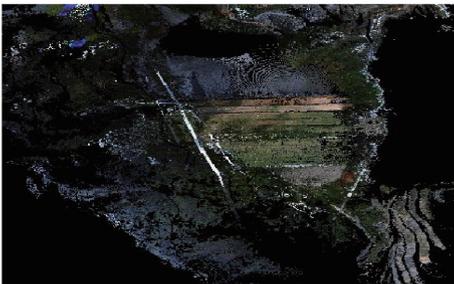


图 6 尾矿库点云图

调洪演算过程中,分别获得调洪库容曲线和不同频率洪水与所需调洪库容计算结果如图 8 所示和表 4。

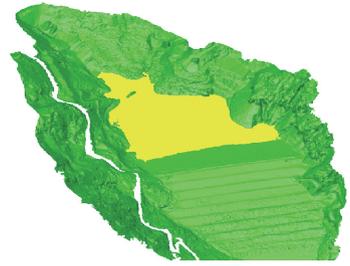


图 7 尾矿库三维建模

表 3 调洪库容计算表

标高/m	面积/ m^2	体积/ m^3
1 691.5	39 980	0
1 692	64 100	26 020
1 693	89 933	103 037
1 694	123 574	209 790
1 695	150 539	346 847

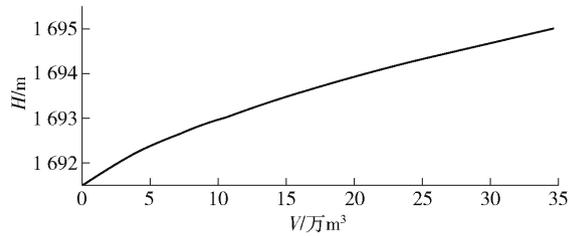


图 8 调洪库容曲线

表 4 不同频率洪水与所需调洪库容计算结果

洪水(N年一遇)	10	20	50	100	200	300	500	1 000
所需调洪库容/ 万 m ³	15.8	30.4	41.3	49.4	58.2	63.1	69.6	78.2

由表 3 和表 4 可知,尾矿库具备的最大调洪库容为 34.7 万 m³ 小于所需调洪库容 69.6 万 m³, 不满足 500 年一遇洪水泄洪要求。



图 9 尾矿库周边环境高分影像图

由高分图 9 可以得出,在距离主河槽 3 m 处有一露天坑,若开挖导流渠将水流引入露天坑,同时在露天坑底部布设足量的水泵,将水抽排至坑外。当

尾矿库内水面高度达到最大高程时(即干滩距离100 m与安全超高1 m对应的水面取小值),尾矿库排洪系统能力为 $9.3 \text{ m}^3/\text{s}$,此时控制上游进入尾矿库的来水流量为 $9.3 \text{ m}^3/\text{s}$,多余的来水则通过导流措施排入露天坑,让露天坑来做临时的调洪库容,只要露天坑的库容足够,就能满足尾矿库的行洪能力。这种方案与修建截洪明渠、扩充现有涵管、重新开挖排洪系统相比显然是最经济合理、技术可行、可靠性高的。

因此,对露天坑进行三维激光扫描,得到精细化的三维激光模型,具体如图10所示。根据三维激光扫描模型得到露天坑体积为 117.3 万 m^3 ,由表2、表3和表4,得到500年一遇洪水一次降雨总量为 107.3 万 m^3 ,所需调洪库容为 69.6 万 m^3 ,尾矿库具备的调洪库容为 34.7 万 m^3 ,欠缺的库容 34.9 万 m^3 则需排至露天坑,由水泵抽出。



图10 露天坑三维建模

5 结论

(1)“空天地”多源测控技术从高分遥感对尾矿

库的大区域监测,到无人机/三维激光扫描对库区的精确控制,形成了一整套立体可视化及数字化灾害监测技术,为数字化安全监管提供了一种科学完整的新思路。

(2)通过对攀西某二等尾矿库的应用,及时发现了行洪系统存在的隐患,运用高分遥感影像和三维实体模型并结合水力学方法进行调洪验算,准确确定调洪库容,再结合高分影像和三维激光扫描模型提出一套经济合理的治理方案,避免了尾矿库后期因行洪能力不足引发的尾矿库溃坝事故,验证了“空天地”多源测控技术在处理安全隐患上的有效性和准确性。

[参考文献]

- [1] Davies M, Martin T, Lighthall P. Mine tailings dams: when things go wrong[J]. Tailings Dams, 2000:261 - 273.
- [2] 霍晨玮,沈振中. 降雨持续时间对某加高扩容尾矿坝渗流稳定性影响分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2021,73(2):16 - 20.
- [3] 尹光志,李愿,魏作安,等. 洪水工况下尾矿库浸润线变化规律及稳定性分析[J]. 重庆大学学报,2010,33(3):72 - 75,86.
- [4] 尹光志,王文松,魏作安,等. 尾矿库加高扩容坝体动力反应与抗震性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(S1):3132 - 3142.
- [5] 于广明,宋传旺,潘永战,等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3238 - 3248.
- [6] 郝喆,侯永莉,张亮,等. 尾矿库在线安全监测系统的设计与应用[J]. 金属材料与冶金工程,2018,46(2):49 - 55.