

面向智慧流域的“陆水空天”安全监测 数据获取技术研究

刘 峰¹, 李大宏¹, 黄张裕², 段兵兵³

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610072;
2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098; 3. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要:智慧流域为传统水电工程安全监测行业注入了新功能,同时也对安全监测信息服务提出了新要求。推动安全监测专业供给服务能力提质增效升级,首先需要加快与全球导航卫星系统、时间序列 InSAR、无人机低空遥感、地基 InSAR、多波束测深系统等空间信息技术的深度融合,着力形成涵盖航天、低空、水面、水下、地面、地下的“陆水空天”多平台安全监测数据获取技术体系,进而构建智慧监测专题服务系统,为智慧流域建设与运行提供高效、协调、智慧的安全监测服务。

关键词:智慧流域;智慧监测;数据获取;空间信息

中图分类号:TV7;TV522

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)01-0013-05

1 概 述

自 2008 年 IBM 首席执行官彭明盛首次提出智慧地球(Smart Earth)概念以来,由其而衍生出来的智慧中国、智慧城市、智慧交通、智慧能源、智慧流域、智慧大坝等一系列新型理念在我国广泛掀起并形成井喷局面。作为智慧地球的具体体现形式之一,智慧流域是流域信息化发展的高级阶段,是由作为流域信息化基础的数字流域、能够实现流域信息全面实时感知的物联网、能够高效智能处理海量数据信息的云计算、能够及时有效提供智慧服务的可视化智能分析系统等组成的流域新型生态系统。

智慧流域建设为后水电时代传统水电水利行业转型升级注入了新动能,水电水利行业部门只有强化需求导向与问题导向,主动革新专业服务能力,催生新技术、新模式、新业态,才能使水电水利事业永葆生机活力。安全监测数据是流域地理空间重大水工建筑物与地质灾害预测预报、反演反馈、健康诊断、隐患识别、灾害预警等智慧服务的重要数据支撑,是智慧流域海量时空信息的重要数据源。

笔者针对智慧流域提出的新理念、新需求,全面总结了涵盖航天、低空、水面、水下、地面、地下等多平台的“陆水空天”安全监测数据获取技术体系,重点分析了全球导航卫星系统(Global

Navigation Satellite System, GNSS)等空间信息技术及其在安全监测中的应用思路,最后强调了构建智慧监测专题服务系统的目标要求。

2 智慧流域对安全监测服务提出了新要求

在智慧流域新理念、新市场、新契机强势冲击下,安全监测行业需要深刻认知多尺度范围覆盖、一站式生产能力、智慧化专题服务、高效能应急保障等新需求、新挑战,主动顺应新趋势,解决新问题,实现新跨越,助力专业供给服务能力提质增效升级。

(1) 多尺度范围覆盖要求。

目前,水电工程安全监测的对象主要是针对水工建筑物和地质灾害点等局部性单体工程,而适用于大面积、全库区、全流域的安全监测技术手段相对不足,因此需要加快与地球空间信息技术融合发展,构建涵盖航天、低空、水面、水下、地面、地下的“陆水空天”多平台安全监测数据获取技术体系,并通过集成化智能传感器网络,为智慧流域建设提供全面、准确、动态、鲜活的安全监测时空数据资源。

(2) 一站式生产能力要求。

在智慧流域新引擎倒逼驱动下,安全监测生产单位若再继续以粗放、狭隘、局部工序的监测施工作为绝对重心,将越来越变得不可竞争、不可持续、不可跨界、不可掌控全局、不可引领发展、不可捍卫地位。唯有大力加强上游与下游、业内与业

外、国内与国外资源的统筹力度,全面打造集“监测设计→系统建设→数据获取→数据处理→数据分析→数据挖掘”全工作流于一体的一站式安全监测供给服务能力,才能在新市场中再立竞争新优势。

(3) 智慧化专题服务要求。

智慧流域的最终目的在于智慧应用。安全监测专业需要在智慧流域时空信息平台框架下依托云计算能力和大数据技术,充分挖掘多源异构海量数据中的高价值信息,聚行业之智研发智慧监测专题服务系统,实现数据来源全面化、数据获取实时化、数据处理自动化、数据分析智能化、数据产品知识化、数据表达可视化、数据服务网络化,为智慧流域提供高效、协调、智慧的安全监测服务。

(4) 高效能应急保障要求。

对流域空间突发灾情的高效能应急保障是安全监测部门的重要职责,围绕“快速数据获取、快

速数据处理、快速分析反馈”的核心要求,安全监测单位需要以战略性高度推进应急装备资源配置,提升应急队伍专业技能水平,不断完善灾害应急与减灾救灾体系,强化联动协作与信息互通,着力形成反应迅速、运转高效、协调有序的应急监测保障机制。

3 “陆水空天”多平台安全监测技术支撑

随着水电工程安全监测市场由云贵川走向藏青新、亚非拉,监测尺度由局部单体工程走向全库区、全流域,环境条件渐趋恶劣,生产成本持续增高,当前以地面和地下(含结构内部)为主的常规离散式监测手段显得心有余而力不足。在智慧流域新需求倒逼驱动下,务必大力推进全球导航卫星系统、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)以及无人机低空遥感等空间对地观测新技术的消化吸收,逐步建成“陆水空天”多平台数据获取技术体系,实现安全监测数据供给能力提质增效升级(表1)。

表1 “陆水空天”安全监测数据获取的主要支撑技术表

监测平台	监测项目	主要监测技术	备注
航天	变形	全球导航卫星系统、星载 InSAR…	
低空	变形	无人机遥感系统、无人机倾斜摄影、航空摄影测量…	流域/区域尺度
水面	变形	多波束测深系统、单波束测深系统…	
水下	水位	水位尺、渗压计…	
地面	变形	监测机器人、全站扫描仪、地基 InSAR、三维激光扫描、光纤传感器水准测量、裂缝计、倾斜仪、加速度传感器…	
	环境量	雨量计、风速风向传感器、干湿温度计、高原气压计…	工程/局部
	变形	监测机器人、全站扫描仪、活动/固定/柔性测斜仪、多点位移计、引张线、正倒垂、静力水准、几何水准、水管式沉降仪、电磁式沉降仪…	尺度
地下	应力应变	土压力计、锚索测力计、钢筋计、光纤传感器、无应力计、应变计…	
	渗流渗压	渗压计、量水堰、水位孔…	

3.1 全球导航卫星系统

随着我国北斗导航卫星系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)的逐步完善并具备亚太地区PNT服务能力,多频多模GNSS特别是BDS/GPS兼容与互操作已成为行业研究、应用及营销的热点。成都院已先后在长河坝、瀑布沟、溪洛渡、锦屏一级等工程中积极实施GNSS变形监测应用并取得了较好的工程效益。但总体看来,这种过多依赖于国内仪器厂家而建立的GNSS系统应用效果并不十分理想,主要表现在数据解算理解不深入、不同厂家软件不兼容、通用式傻瓜式不灵活,特别是在高精度、高可靠度、高灵敏度的

混凝土大坝安全监测中,仍未有成熟完整的解决方案。因此,有必要针对以下课题展开相关研究,以使更深入地理解GNSS变形监测数据处理的方法与策略,进一步提升GNSS应用生产能力。

(1) BDS/GPS组合定位。

BDS/GPS组合定位可以利用双系统丰富的导航信息,极大地提高用户的可用性、精确性、完好性和可靠性,是解决深山峡谷地区重大水工结构高精度变形监测问题的首选思路。

其数据处理关键技术:一是多模GNSS兼容与互操作,即时间参考框架、坐标参考框架和空间信号的统一,选择统一参考卫星;二是基于等权模

型或高度角定权的单系统观测值定权策略；三是基于先验定权或 Helmert 方差分量估计的系统间观测值定权策略；四是 GNSS 载波相位观测值预处理、基线解算与网平差。然而，目前国内随机软件产品所采用的 BDS/GPS 组合定位模型基本为松耦合模型，并未实现深度兼容与随机互操作，且变形监测多采用单基线解模式，其精确性与可靠性相对较弱。

深入研究 BDS/GPS 精密变形监测核心算法的一种有效途径是借力 GAMIT、Bernese 和 RTKLIB 等科研软件严密的数学模型并进行二次开发，进而构建适用于水电环境的、基于高精度静态相对定位方法的变形监测自动化数据处理软件，为大坝外观自动化系统设计与改造的一站式解决方案提供核心软件支撑。

(2) GNSS 单历元定位。

单历元变形监测方法从基准点和监测点的双差观测值变异中直接提取变形矢量。当变形量对双差观测值的影响小于半个波长时，可避开周跳的探测与修复以及整周模糊度的确定等棘手难题，使 GNSS 数据处理效率大为提升。该方法充分利用监测时目标点在一定范围内变化的特点，使数据处理不受 GNSS 信号连续跟踪中断的影响，并能够及时而准确地获取目标点变形的空间状态和时间特性，特别适用于形变量较小的短基线工程变形监测领域。

常规单历元方法要求变形量小于双差观测值的半个波长，因此，在实际工程应用中需要及时、定期更新计算初始坐标，从而给自动化连续监测工作带来了一定的不便。为此，需要对常规模型进行改进优化，常用的方法一是利用波长较大的宽巷组合观测值，二是单历元实时解算整周模糊度。成都院在瀑布沟水电站移民迁建工程中采用了基于宽巷组合观测值的单历元方法，该系统运行近 5 年来，数据处理效率高，性能稳定、可靠。

(3) 非差相位精密度单点定位。

非差相位精密度单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 的基本原理在已知精密星历和卫星钟差的前提下，充分考虑了与卫星、传播路径、接收机等有关的各种误差改正，利用单测站直接确定 ITRF 框架坐标系内的地心坐标。该方法于 1997 年由美国喷气推进实验室 (JPL) 提出，并在其研

发的 GIPSY 软件上予以实现。随着近年来模型研究的逐步完善，未来有望对现今主流相对定位模式带来突破性影响，具有十分重要的现实意义和广泛的应用前景。

相比相对定位方法而言，PPP 方法无需设置参考站（或基准站），不受观测距离和网形的限制，可直接获取 ITRF 框架三维地心坐标，单台接收机实现 cm 级定位精度，作业方式灵活、成本降低、效率提高，极大地降低了用户使用门槛，便于各行业群体推广应用。

目前，瑞士伯尔尼大学的 Bernese 软件和日本东京海洋大学开源 RTKLIB 软件均实现了 PPP 功能，在库区土质滑坡、泥石流等地质灾害监测方面，可基于此采用“GPS + IGU”方法开展实时动态监测，也可采用“GPS + IGS/IGR”方法用于事后的精密变形监测。

3.2 时间序列 InSAR

合成孔径雷达干涉测量是一种快速发展的大地测量与雷达遥感技术，具有覆盖范围广、变形灵敏度高、空间分辨率高、重复周期稳定、几乎不受云雨天气制约等优势。与常规点式离散监测方式相比，能够以图像形式直观而清晰地呈现测区的整体运动与地表形变，大大压缩人力及物力成本。近 20 a 来，星载 InSAR 已在地形测绘、灾害监测评估（地震地壳形变、火山运动、山体滑坡、区域地面沉降等）、能源资源勘查（油气田开采、矿藏资源开采、地下水抽采等）、全球环境变化（冰川消融、冻土退化、冰川漂移、极地冰层变化等）等相关领域得到了广泛应用，并取得了一系列重要的研究成果。

时间序列 InSAR 解决了常规差分干涉测量 (Differential InSAR, D-InSAR) 存在的时间去相关、空间基线去相关和大气延迟效应等问题，显著提高了地表形变测量的精度（真正实现了 mm 级）和可靠性，并由此拓展到缓慢小尺度地表微变监测领域，极大地推动了 InSAR 的技术发展。

目前时序 InSAR 方法中应用最为广泛的为永久散射体技术 (PS-InSAR) 和小基线集技术 (SBAS-InSAR)。其中 PS-InSAR 技术是大面积、高精度地表微弱形变监测的重大技术突破，具有极大的应用潜力和广阔的发展前景，其基本思想是利用覆盖同一地区的一组时间序列 SAR 影

像(通常>20景)进行干涉对组合与差分干涉处理,且仅对具有高信噪比~高相干性的PS目标(如建筑物、桥梁、混凝土坝等人工建筑以及裸露的岩石等天然硬目标)建立差分干涉相位建模,通过参数解算分离大气延迟相位信息,进而提高地表变形监测的精度与可靠度。

2008年以来,高分辨率、多极化、多星座、短重访周期等新型星载SAR系统取得了长足发展,商业化SAR数据源选择更加丰富,主要代表性雷达卫星包括日本ALOS-2、加拿大Radarsat-2、德国TerraSAR-X、意大利Cosmo-Skymed等,主要代表性影像处理软件有瑞士GAMMA、加拿大EarthView以及荷兰Doris(开源)等。

星载时间序列InSAR必将成为智慧流域重要的时空数据获取手段。在拓展其在水电环境应用的同时,有必要在电站库区(如楞古库区和溪洛渡库区)开展InSAR形变监测可行性试验研究,分析地形起伏、植被覆盖、气候变化对常规D-InSAR技术的影响程度,检验时间序列InSAR技术的应用效果,通过库区高空间分辨率缓变灾害检测结果,有针对性地拓展高时间分辨率的GNSS自动化实时/近实时形变监测业务;其次,在库区可行性试验的基础上,拓展全库区全流域地质灾害定期普查、应急排查以及缓变灾害常态化监测业务;同时,基于高分辨率SAR影像与时序InSAR技术,开展电站枢纽区及高土石坝单体精细监测。

3.3 无人机低空遥感

无人机遥感(Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing, UAVRS)是以无人驾驶飞行器为遥感平台,以遥感传感器为任务载荷,以遥感影像快速处理为技术支撑,结合遥测控制技术、无线通信技术、DGNSS/IMU定位定姿技术,高机动、低成本、自动化快速获取地理资源环境等空间遥感信息并进行实时/事后处理与应用分析的新型航空航天遥感技术解决方案。UAVRS弥补了卫星遥感与航空遥感在对地观测精度、时效和频率上的不足,是云下低空(<1 000 m)平台遥感手段的重要补充,具有灵活机动、高效快速、精细准确、高性价比等优势,在生态环境、资源调查、防灾减灾、公共安全、地理国情监测等经济社会各领域具有巨大的应用潜力。

成熟完备的民用无人机低空遥感系统主要由无人飞行器系统、有效任务载荷、地面保障系统和影像信息处理系统四部分组成。无人飞行器系统除无人机飞行平台外,还包括动力推进系统、飞行导航与控制系统、数据传输链路机载部分、起降系统机载部分;有效任务载荷一般采用经标定的、有效像素大于2 000万的普通数码相机;此外,其还包括必要的气象传感器包。在满足平台载重能力时,亦可搭载小型InSAR、LiDAR以及视频设备等;地面保障系统主要包括地面监控系统、数据传输链路地面部分、起降系统地面部分以及有关后勤人员与辅助设备等;UAVRS影像信息处理一般需要通过畸变校正、影像匹配与空三加密等程序,生成DEM和DOM,并用于遥感图像解译与专题分析,目前常用的UAVRS影像处理软件主要有国外的Inpho、PixelFactory、Pix4Dmapper,国内的MapMatrix、DPGrid、PixGrid等。与通用摄影测量与遥感数据处理不同,UAVRS影像处理存在自动、快速、应急的性能要求,因而研发自动化、实时化、智能化的高性能UAVRS影像处理系统已成为未来推陈出新的前提。

自“5·12”汶川地震以来,UAVRS被广泛应用于地质灾害调查、监测与评估,并逐步发展成为应急监测保障的重要技术手段。在水电站库区及江河流域,通过UAVRS高分辨率重复遥感影像的对比分析,可以实现对地质灾害的全面排查、地质灾害隐患点识别及其动态监测;也可在地震、滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等突发灾情发生后短时间获取大量现势遥感信息,为减灾救灾提供更加客观、及时、全面、具体的灾情信息;此外,将无人机遥感影像与GIS平台相结合,构建决策支持系统,可以大大提升灾害分析、评估与预报的能力和水平。

3.4 地基InSAR

近几年发展起来的地基合成孔径雷达干涉技术(Ground-based InSAR, GB-InSAR)是基于微波探测主动成像方式获取监测区域的二维影像,通过合成孔径和步进频率连续波(SF-CW)技术提高雷达影像方位向和距离向空间分辨率,通过比较影像中目标点的电磁波相位信息,采用干涉技术求取监测区域的变形量。

地基SAR技术克服了星载SAR存在的时空

失相干问题,具有局域性、全天时、全天候、实时监控以及良好的灵活性和可操作性,实现了合成孔径雷达干涉测量技术的工程化应用,是水电工程混凝土大坝、抗滑支挡结构、高陡边坡、桥梁等重大工程建(构)筑物微变监测领域极具潜力的新技术与新方法。目前国内使用的地基 InSAR 主流仪器产品为意大利 IDS 公司和佛罗伦萨大学研发的 IBIS-L 系统,其遥测距离可达 4 km,标称测量精度达 0.1 mm,能够精确测定被测物表面沿雷达视线向(Line of Sight, LOS)的微量变形信息。

由于地基 SAR 系统在大气改正、观测断点以及数据融合等方面仍有待进一步提高,且其仪器装备和数据处理软件成本较高,导致目前其应用基本处于试验研究阶段。但其一维 LOS 向特高精度变形探测能力对于深入研究运行期高混凝土坝在温度、水位及时效荷载影响下的变形机制具有无可替代的技术优势。

3.5 多波束测深系统

多波束测深系统是现代信号处理技术、高性能计算机技术、高分辨显示技术、高精度导航定位技术、数字化传感器技术以及其它多种技术高度集成的一种复杂的组合系统。其工作原理是利用安装于船底的发射换能器阵列向水底发射宽扇区覆盖的声波,通过对接收换能器阵列接收的反射信号进行处理,结合 GNSS 导航定位和 IMU 姿态数据,绘制出高精度、高分辨率的水下三维地形图。与传统单波束测深系统相比,具有全覆盖扫描、记录数字化、成图自动化等特点,测量范围更广、速度更快、精度和效率更高。

目前国际上知名的多波束测深声纳产品主要有美国 R2SONIC 公司的 SONIC 系列、丹麦 RE-SON 公司的 Seabat 系列、挪威 Kongsberg 公司的 EM 系列、美国 ELAC 公司的 SeaBeam 系列等。对于多波束测深声纳产品,需要配置诸如 GNSS 接收机(可接入 CORS)、IMU、表面声速仪、声速剖面仪等外围设备,一般支持单独外购,但同时也增加了野外观测前系统集成调试的难度与复杂度。近年来,国产多波束测深声纳系统也取得了较大发展,如海卓同创于 2016 年 2 月推出的 Seasurvey MS400 浅水多波束测深仪,实现了与 DGNSS 和 IMU 模块的一体化集成,无需测前安装校准,

从而大大降低了用户的使用门槛。该系统配备的导航采集软件能实时显示水底地形图,其数据后处理可采用国际知名的 Hypack 水文综合测量软件。

多波束测深声纳系统作为海洋测绘的核心仪器装备,现已在内陆江河流域中获得广泛应用,并成为时空数据获取的重要补充手段,也是进一步拓展河道勘测、水下大比例尺地形图、库容计算、冲淤分析、水下目标探测、水下应急救捞等相关业务的必备技术手段。

4 结语

(1)智慧流域是数字流域的升级版,是流域信息化发展的高级阶段。传统水电工程安全监测行业唯有主动革新专业供给服务能力,顺应新形势,服务新需求,解决新问题,培育新模式,重塑新优势,推动转型升级与提质增效,才能在智慧流域新市场中永葆生机与活力。

(2)智慧流域建设离不开全面、准确、鲜活的安全监测时空数据支撑,安全监测专业需要加快与全球导航卫星系统、时间序列 InSAR、无人机低空遥感、地基 InSAR、多波束测深系统等空间信息技术深度融合,着力形成“陆水空天”多平台安全监测数据获取技术体系,实现安全监测数据供给能力提质增效升级。

(3)智慧流域对安全监测的最终要求在于构建智慧监测专题服务系统,实现数据来源全面化、数据获取实时化、数据处理自动化、数据分析智能化、数据产品知识化、数据表达可视化、数据服务网络化,为智慧流域建设与运行提供高效、协调、智慧的安全监测服务。

作者简介:

刘 峰(1984-),男,河南信阳人,工程师,硕士,研究方向:变形监测与安全评价;

李大宏(1958-),男,山东平邑人,工程师,从事工程安全监测与管理工作;

黄张裕(1969-),男,浙江宁波人,副教授,博士,从事精密工程测量、卫星定位测量、安全监测、海洋测绘等方面的教学和研究工作;

段兵兵(1985-),男,江苏宿迁人,博士,研究方向:卫星大地测量与应用。

(责任编辑:李燕辉)