



卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用 进展与思考

姜卫平¹ 梁娱涵¹ 余再康² 肖玉钢³ 陈 剡¹ 陈渠森¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 贵州省大坝安全监测中心,贵州 贵阳,550002

3 长江空间信息技术工程有限公司(武汉),湖北 武汉,430010

摘 要:变形监测是水利工程安全运行的重要保障。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)具有高精度、全天时、全天候等优势,为水利工程变形监测提供了新的手段。目前,以卫星定位技术为代表的变形监测技术正在向着全过程、全方位、全自主的智能化方向发展。着眼于水利工程变形监测的需求,首先对变形监测技术的发展进行了回顾;其次,介绍了卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展;然后,围绕当前GNSS变形监测应用的难点与局限进行讨论;最后,展望了未来GNSS水利工程智能化监测的发展方向。

关键词:GNSS;变形监测;水利工程;智能化监测

中图分类号:P228;P258 **文献标志码:**A

水利工程是为配置、调控、利用和保护地表与地下水资源及环境而修建的工程基础设施^[1]。新中国成立以来,中国水利工程建设发展迅猛,特别是推动实施了以长江三峡、南水北调等为标志的一系列重大水利工程,形成了世界上规模最大、范围最广、受益人口最多的水利基础设施体系,为促进经济社会可持续发展奠定了坚实的基础^[2]。随着中国经济发展已由高速增长阶段转向高质量发展阶段,加快推进重大水利工程建设,织密国家水网,增加水利高质量产品和服务供给,已成为新阶段水利发展的必然要求,也是推动国家能源转型,实现碳达峰、碳中和战略目标的重要支撑。截至2022年7月底,南水北调中线引江补汉工程、淮河入海水道二期工程等重大项目已开工,在建水利项目达到3.18万个^[3]。

水利工程建设不同于一般的土木工程,具有建设规模大、结构形式多样、地质条件各异、载荷冲击复杂、施工周期长等特性。“水利无小事”,一旦发生事故,将会导致非常严重的后果。水利工程在长期服役过程中承受动、静循环载荷和突发性灾害等共同作用,结构性能会发生退化,极端

情况下甚至会造成垮塌等灾难性事故,造成严重的生命和财产损失^[4-6]。以水库大坝为例,1954—2018年间,中国累计溃坝3 541座,年均54.5座,年均溃坝率达到了0.063%,给人民的生命和财产造成了严重损失。其中,2000年后,溃坝84座,占溃坝总数的2%,年均溃坝率已降至0.004%,显著低于世界公认的0.02%的低溃坝率水平^[6]。因此,加强水利工程安全监测与管理,是保障其长期安全运行的技术基础,也是国家层面的战略需求。

目前,中国水利工程安全监测在信息化、自动化、智能化方面仍存在不足。以水库大坝安全监测为例,中国于2016年组织了全国水库大坝安全监测设施建设与运行现状调查,收集了27个省份2 949座大中型水库和90 180座小型水库的安全监测资料,发现存在以下问题:预警设施建设仍不完善,35%以上的大中型水库以及90%以上的小型水库缺乏安全监测设备,尤其是表面变形监测设备;安全监测自动化程度相对较低,大型、中型水库部分或全部采用人工观测的约占各自总数的85%和74%,已建设自动化安全监测系统

收稿日期:2022-09-16

项目资助:国家杰出青年科学基金(41525014);湖北省科技创新人才及服务专项(2022EJD010);国家自然科学基金(42004017);武汉市知识创新专项(2022010801010107)。

第一作者:姜卫平,博士,教授,博士生导师,研究方向为卫星大地测量学理论与方法及工程应用研究。wpjiang@whu.edu.cn

且能正常运行的仅占35.2%和17.8%;监测资料的分析不够充分,难以实现智能决策与预警^[5]。目前,海量监测数据大多仍滞留在水库大坝管理单位,尚未与各级水行政主管部门实现完全的互联互通,导致安全监测信息分析实时性和科学性不足,难以及时发现并确认隐患及异常^[5]。因此,强化卫星定位、遥感、人工智能、5G等新一代信息和通讯技术与水利工程安全监测的深度融合,也是国家大力推进智慧水利建设的工作重点。

本文旨在对卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展进行总结与展望。首先介绍了水利工程表面变形监测的需求与发展,并阐述了全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术的特有优势及适用场景;其次,总结了变形监测应用中常见的GNSS监测技术;然后,讨论了现有GNSS变形监测应用中的难点与局限;最后,对GNSS在水利工程智能安全监测中的应用提出了几点思考。

1 水利工程表面变形监测的需求与发展

1.1 监测需求

水利工程具有复杂性和差异性等特点,不同水利工程所采取的变形监测技术应具有针对性、适用性和科学性,以满足相应工程建设管理的需求。变形监测方案设计应考虑水利工程的规模级别、工程水文、地质条件、基础设计、荷载条件和不同监测技术的可靠性、建设成本等因

素,明确监测方案的具体内容,包括设计目的、监测内容、仪器选取、测点布置、精度需求等,实现利用最合理的监测技术,选用最少的测点,最可靠地获取水利工程最全面的变形信息。

水利工程的变形监测精度需求应根据水利工程的级别和工程失事的影响程度等因素共同确定,在监测方案设计时做出具体的要求。目前,经过广泛的调查研究,并结合国内外水利工程监测技术的发展和成功应用经验,已经形成了一系列水利工程变形测量标准,如《水利水电工程安全监测设计规范》《水利水电工程施工测量规范》《混凝土坝安全监测技术规范》《土石坝安全监测技术规范》等,明确了一些典型水利工程的变形监测精度限差,包括混凝土坝、土石坝、边坡及开挖工程、溢洪道、围堰工程等,详见表1^[7]。混凝土坝相较于土石坝,坝的结构和施工过程更加复杂,且多为水力发电的大型水利大坝,监测精度要求相对较高,而且考虑重力坝、支墩坝、拱坝等不同坝型特点,采取了不同的观测要求,其坝体水平位移监测精度要求为1~2 mm,垂直位移监测精度要求为1 mm,坝基位置的监测要求更高,而土石坝的水平位移和垂直位移监测精度满足3 mm即可。同理,边坡及开挖工程、溢洪道、围堰工程等其他水利工程的精度需求应根据工程的材料、性状和观测目的,确定以掌握运行状态为目的的必要精度要求。当然,监测精度也不是一个永久不变的指标,在一些特殊的水利工程监测应用中可以根据工程要求、场景特点及相关标准规定等综合确定。

表1 典型水利工程变形监测精度需求

Tab.1 Requirements for Deformation Monitoring Accuracy of Typical Water Conservancy Projects

工程类型	监测项目	位移量中误差限值
混凝土坝	水平位移	拱坝坝体径向:2.0 mm;拱坝坝体切向:1.0 mm 重力坝、支墩坝坝体:1.0 mm;重力坝、支墩坝、拱坝坝基:0.3 mm
	垂直位移	重力坝、支墩坝、拱坝坝体:1.0 mm;重力坝、支墩坝、拱坝坝基:0.3 mm
土石坝	水平位移/mm	3.0
	垂直位移/mm	3.0
边坡及开挖工程	水平位移	近坝区岩体和高边坡:2.0 mm;岩质边坡滑坡体:3.0 mm;岩土或土质边坡滑坡体:5.0 mm
	垂直位移	近坝区岩体和高边坡:2.0 mm;滑坡体:3.0 mm
溢洪道	水平位移/mm	2.0
	垂直位移/mm	2.0
围堰工程	水平位移	混凝土围堰:4.0 mm;土石围堰:10.0 mm
	垂直位移	混凝土围堰:2.0 mm;土石围堰:20.0 mm

注:位移量中误差一般相对于工作基点而言,特殊情况下监测精度要求可根据实际情况在设计中确定

1.2 监测技术发展

20世纪50年代,水利工程结构体的外观变形监测通常使用经纬仪、水准仪等光学测量仪器结合人工测量的方式进行。其劳动强度大、自动化程度低、易受天气环境的影响,无法获取长期、连续的监测成果。1970年以来,电子测量仪器出现,其原理是将观测的几何量转换成电量的变化,如静力水准仪、渗压计、测斜仪、沉降计等,电子传感器可以自动记录传感器的监测数据,使得水利工程监测系统进入了自动化时代,但电子传感器可靠性低,各传感器之间相互孤立,集成化程度低。1990年以来,GNSS凭借其全天候、连续、自动化获取高精度三维表面变形的优势,逐渐被应用于水利工程外观变形监测。随着中国北斗卫星导航系统的建设完成以及GNSS的不断发展完善,卫星定位技术在复杂环境下的监测服务能力得到提升^[8],在水利工程安全监测中的应用范围也日益广泛。

2 水利工程变形 GNSS 监测技术与应用

2.1 GNSS 监测的技术特点

GNSS作为变形监测领域的代表性技术手段,具有全天时、全天候、全同步、全自动等优势。

1)全天时:GNSS能够根据实际监测任务的需要在设定的任意时间实时/准实时输出监测成果,相比于传统人工监测需要先外业、后内业的工作模式,这一特点使得GNSS能够实现特殊情况下的应急快速响应。

2)全天候:GNSS理论上能够实现任何气候条件下的监测,在暴雨等光学仪器难以作业的恶劣天气下仍能够正常工作,这对于汛期水利工程的安全监测具有重要意义。

3)全同步:全站仪、水准仪通常需要逐点测量监测点的水平或垂直位移,GNSS能够同时监测工程体所有测点的三维变形。而且,传统变形监测中,高程通常使用水准测量方法单独监测,而GNSS测量可以同时获取平面与高程的变形情况。尽管GNSS测量的是大地高,而实际工程监测等应用中需要的是正常高。但在同一测点上,大地高的变化和正常高的变化可认为是一样的,因此,可以采用GNSS进行垂直变形测量^[9]。

4)全自动:在现代通讯与计算机等技术支持下,GNSS能够实现数据采集、传输、处理、分析、存储和显示等全流程的自动化作业。

2.2 GNSS 监测中的定位技术

1)静态差分技术。静态差分技术是指累积一定时长的GNSS观测值后,基于测站间差分方法消除大气误差等距离相关误差,对观测数据整体处理的技术。静态差分技术在GAMIT、Bernese、PANDA等软件中得到广泛应用。在GNSS监测模型中,模糊度参数与监测精度紧密相关。随着观测时长的增加,卫星飞过的轨迹更长,解算同一个模糊度参数可用的历元更多,解算精度随之提升。同时,静态差分解可以在解算前进行周跳探测,将时段内所有模糊度参数预先标记,提升模糊度参数估计的可靠性。同时,在初次解算后,可以对该时段的解算残差进行分析,调整对应观测值的权重,提升解算精度。差分解可以达到平面0.5~1 mm、高程1 mm的极限精度^[10-12],通常应用于水库大坝等高精度变形监测。

2)RTK技术。实时动态定位(real-time kinematic positioning, RTK)技术是将监测站与参考站数据差分,消除距离相关误差,实时处理当前历元GNSS数据的技术。基于最小二乘降相关平差法(least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)^[13]等模糊度快速固定方法,RTK技术可以瞬时解算整周模糊度,实现毫米级高精度定位,在滑坡等实时性需求较高的变形监测中广泛应用。目前,RTK技术监测精度可达平面5~10 mm、高程10~20 mm^[14]。然而,RTK高精度定位结果对解算模型强度的需求高,基线过长、观测条件差、信号质量低等均会造成模糊度固定失败,导致RTK定位精度显著降低。通常,参考站与监测站的距离不超过20 km。此外,RTK技术需要参考站与监测站双向通讯,对站点的通信链路要求较高。因此,RTK技术对参考站的数量与建设标准要求较高,在变形监测中的应用受到限制。

3)网络RTK(network RTK, NRTK)技术。NRTK技术是在RTK技术基础上,利用监测站周边多个GNSS参考站,对距离相关误差建模,修正RTK定位结果的技术。NRTK将参考站与监测站的距离由20 km提升至约200 km。在此范围内,基于参考站网,可以建立高精度距离相关误差的实时修正模型^[15]。目前,NRTK技术监测精度可达平面20~30 mm、高程30~40 mm^[16]。NRTK技术通常需要建立一个或多个数据处理中心,以便于收集参考站观测数据并对其进行预

处理。大气误差是影响NRTK定位结果的关键因素,在参考站之间分布不均,难以精确建模。与RTK技术相比,NRTK技术定位精度下降,且存在区域内定位精度不一致等问题。

4)精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术.PPP技术是基于精密轨道、钟差等定位产品,无需借助参考站,直接获取监测点高精度绝对坐标的技术^[17]。借助GNSS分析中心播发的实时定位产品,PPP技术可以在全球任意位置提供监测服务。然而,由于大气延迟等误差的影响,PPP需要数10 min的收敛时间才能达到厘米级定位精度。此外,如果发生数据中断,PPP会出现重收敛问题,降低了PPP监测的可靠性。目前,PPP技术监测精度可达平面30~50 mm、高程50~100 mm^[18]。已有部分研究围绕PPP快速

收敛技术开展,其在变形监测中的应用仍处于发展阶段。

5)PPP-RTK技术。PPP-RTK技术将PPP和RTK两种技术相结合,在服务端利用少量参考站数据对距离相关误差建模并播发,用户端可以在周边大范围内以PPP模式进行定位。与RTK和NRTK技术相比,PPP-RTK技术仅需参考站向监测站播发误差改正信息,降低了通讯压力,且服务范围显著提升。与PPP技术相比,PPP-RTK技术缩短了收敛时间。然而,PPP-RTK技术目前仍有大气建模、偏差改正等关键技术问题尚未解决,其定位精度约为平面30 mm、高程50 mm^[19]。目前,PPP-RTK技术在变形监测领域的应用仍处于探索阶段。高精度GNSS定位技术精度对比见表2。

表2 高精度GNSS定位技术对比

Tab.2 Comparison of High-Precision GNSS Positioning Technologies

解算模式	响应时间	精度范围/mm	适用变形监测场景
静态差分	近实时	平面:±(0.5~1) 高程:±(1~3)	高精度变形监测,例如大坝安全监测等
RTK	实时	平面:±(5~10) 高程:±(10~20)	小范围、高实时性变形监测,例如小型边坡等
NRTK	实时	平面:±(20~30) 高程:±(30~40)	大范围、高实时性变形监测,例如大范围沉降监测等
PPP	实时	平面:±(30~50) 高程:±(50~100)	
PPP-RTK	实时	平面:±(30~50) 高程:±(50~100)	

2.3 GNSS水利工程监测应用

自全球定位系统(global positioning system, GPS)问世以来,研究人员就尝试采用其进行地表形变监测。早在1984年,Strange应用GPS研究了亚利桑那州东南部沉积盆地的大面积沉降,并与水准监测结果进行比较,结果表明两者相差0.8~3.5 cm^[20]。目前,已有大量研究验证了GNSS技术在水利工程监测中的有效性。例如,1995年,Hudnut等^[21]在美国加利福尼亚州Pacoi-ma大坝开展GPS监测工作,利用GPS监测出大坝变形量,且变形量与水库蓄水量变化一致性非常高。Carla等^[22]在法国南阿尔卑斯Super-Sauze滑坡进行GNSS长时间连续测量,1 km基线1 h时段解精度可达毫米级。徐绍铨等^[23]在三峡库区滑坡开展GPS监测,提出了库区外观变形监测中的最优解算方案。王利等^[24]通过在大型黄土型滑坡进行物理模拟实验,论证了在观测条件较

好和基线较短的条件下,GPS RTK技术在滑坡快速变形的动态实时监测中应用的可行性。袁有仓等^[25]在长河坝水电站高边坡,针对高边坡GNSS信号受遮挡的问题,基于北斗+GPS双星系统,探索利用双星数据融合解决这一问题的方法,完成GNSS网整体处理,使得可视卫星数不断增多,提高了高边坡的解算精度,精度达到3~5 mm。除上述研究以外,GNSS在工程应用领域已取得了丰富的成果。

下文以几个系统为例,阐述GNSS水利工程监测的发展历程。

1)隔河岩大坝变形自动化监测系统。1996年,刘经南等首次在隔河岩大坝成功建立自动实时的GPS变形监测系统^[26]。该系统综合采用了微波、光纤等通讯手段,实现实时、自动化监测,水平精度达到0.5 mm,垂直精度达到1.0 mm,并在1998年长江抗洪中发挥重要作用。该系统是

将 GPS 应用于实践的成功典范,为后续 GPS 变形监测系统的发展积累了宝贵的经验。

2)西龙池上水库大坝表面变形监测系统。2009年,姜卫平等^[11]建立了山西西龙池抽水蓄能电站上水库表面变形 GPS 自动化监测系统,至今连续稳定运行。该系统 4 h 解精度水平优于 1.0 mm,垂直优于 1.5 mm。同时,姜卫平等^[27]基于 GNSS 坐标时间序列分析技术,量化各信号成分,结合外部荷载数据解释了西龙池大坝长期变形成因。

3)小湾拱坝 GNSS 自动化监测系统。2011年,小湾水电站大坝 GNSS 系统正式运行,监测系统包含 2 个基准站、15 个连续观测的监测站。王川等^[28]将小湾水电站 GNSS 监测数据与传统的全站仪、正倒垂线测量数据进行对比,数据结果一致性较好。

4)南水北调中线干线工程安全监测。2017年以来,利用北斗、合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)、无人机、柔性测斜仪等空天地体现代监测技术,在南水北调中线工程开展了多尺度、全方位、智能化监测的关键技术验证。其中,南水北调中线北斗自动化变形监测系统实现了平面 1 mm、高程 1.3 mm 监测精度,与水准测量差异仅为 1 mm。

5)贵州省中小型水库大坝北斗自动化变形监测系统。2020年以来,中国开始大力开展中小水库安全监测。贵州省基于北斗/GNSS 技术,综合水文、气象、监控视频等数据,建立了中小型水库大坝北斗自动化变形监测系统。目前,该系统涵盖了省内约 86 座水库,平均每座水库包括 4 个监测点位,能够对水库雨水情况及变形情况进行实时监测,平均定位精度可达平面优于 2 mm,高程优于 3 mm。

此外,在三峡茅坪溪防护坝等水利工程中也构建了北斗自动化变形监测系统,利用单北斗数据,实现了 4 h 解平面优于 1 mm、高程优于 1.5 mm(见表 3),24 h 解平面优于 0.3 mm、高程优于 0.6 mm 的监测精度。图 1 显示了测站 GNSS05 北斗数据 4 h 结果,进一步验证了北斗具备 1 mm 级精度的监测能力。

3 水利工程变形 GNSS 监测难点与局限性

3.1 水利工程变形 GNSS 监测难点

1)工程复杂环境下毫米级精度定位难。水

表 3 不同方法解算精度统计表

Tab.3 Accuracy of Different Solutions

数据	北斗/mm			GPS/mm			北斗+GPS/mm		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
4 h	0.5	0.6	1.3	0.5	0.4	1.2	0.5	0.4	1.0
24 h	0.2	0.2	0.6	0.3	0.2	0.6	0.2	0.2	0.5

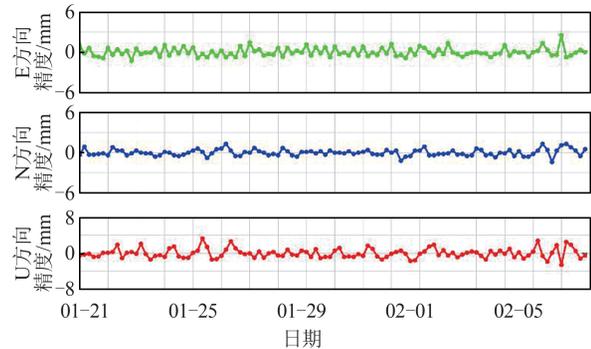


图 1 测站 GNSS05 北斗数据 4 h 结果

Fig.1 Results of BDS Data 4-Hour-Session of Station GNSS05

利工程监测要求的精度不仅高,而且所在区域的环境通常较为复杂,建筑密集、植被茂密、地形崎岖,会导致测站间高差大、天空被遮挡、多路径效应显著等问题,将严重影响 GNSS 定位精度。

如何选择合适的基准点与监测点,是 GNSS 高精度监测面临的一大难题。水利工程周边地质条件复杂,难以保证基准点的稳定性。若基准位置发生变化,其位移信号将与监测结果混叠,影响监测结果的可靠性。而且,水利工程结构复杂,重点监测区域通常存在天空被遮挡、靠近水体等问题,GNSS 卫星信号质量差,对定位精度有严重影响。然而,若仅考虑满足 GNSS 观测条件,选取开阔区域布设测点,通常无法监测结构体的关键部位,难以满足水利工程的变形监测需求。

设备的规范部署是 GNSS 变形监测中重要却容易忽略的难题。设备安装和调试不规范,将导致监测结果精度下降、可靠性不足甚至完全不可用。例如,基准点未安置在稳定的观测墩上,GNSS 天线旁护栏或太阳能电板遮挡天线,监测过程中频繁更换不同类型天线和接收机等。然而,现有应用中,在安装和调试设备时,由于现场施工条件限制,通常难以严格按照规范中要求执行。此外,由于 GNSS 自动化变形监测对连续性要求较高,在系统正式启动后,需要尽量避免更换硬件设施,保证系统稳定运行。

水利工程所在区域独特的气象、地质条件,

使GNSS高精度数据处理成为难题。通常测区的对流层变化剧烈,且基准站与监测站之间高差较大,GNSS信号传播路径误差难以通过差分消除,影响GNSS定位结果。不同水利工程的观测条件独特,难以建立通用的GNSS数据处理模型,只能针对具体工程、具体环境开展研究,寻找最适合的GNSS数据处理方法。

2)变形信号准确提取难。自20世纪90年代以来,北斗/GNSS技术在水利工程安全监测领域得到了广泛应用,积累了大量连续的观测资料。GNSS变形时间序列可以定义为一组在指定坐标系下按照时间顺序排列的测点三维位置相对于某一指定坐标基准值的变化。变形时间序列包含线性项、非线性项以及阶跃等信息。其中,线性项主要是表现为水利工程在自身重力、环境等因素影响下的长期变化趋势,如大坝自身的固结沉降。非线性项主要来源于3个方面:(1)测站在温度荷载、潮汐效应等影响下产生的真实变形,包括工程体自身以及观测墩的热膨胀效应等;(2)由于GNSS数据处理模型、策略等不完善造成的虚假非线性变化;(3)由其他未模型化因素造成的变形及噪声。阶跃,通常也可以看成是变形跳变,主要是由于更换天线或极端情况(如地震)等因素造成。准确分离变形时间序列中的线性、非线性信号与噪声是变形机理解析的基础,也是分析评估工程体安全状态的必要前提。这需要解决以下几个难点:进一步完善GNSS解算模型和策略,以获取更加准确的测点变形;建立更加严密的三维噪声模型,使得线性、非线性信号参数估计更加可靠;构建更加精细的变形时间序列非线性信号分析模型,以精确分离变形时间中的虚假性信号、热膨胀信号等,进而得到更加真实的工程体长期变化特征,为其安全状态的评估提供参考依据。

3)变形预测难。水利工程监测获取的GNSS时间序列包含的信息较为复杂,既包含监测点真实位移信息,又包含由于数据处理模型不完善或其他未模型化因素误差引起的形变或观测噪声,将严重影响GNSS建模预测精度。

GNSS时间序列数据预处理困难。受GNSS观测环境及数据传输的影响,未经处理的GNSS时间序列可能会出现数据缺失和粗差等问题,无法直接对其进行分析与建模。当数据出现缺失或粗差较少时,常用人工作业的方式对GNSS时间序列进行预处理。然而,随着观测自动化程度

的提升,GNSS时间序列数据量急剧增加,这导致采用人工作业的方式难以对其进行高效的处理,亟需更为便捷高效的数据处理方法。近年来,GNSS时间序列预处理方法迅速发展,但在实际工程中的应用较为缺乏,难以针对具体工程中的时间序列进行预处理。

GNSS时间序列数据特性使建模预测成为难题。水利设施中的GNSS坐标时间序列所含信息复杂,既包含长期的地壳运动周期性,又包含监测点本身的周期特性,当周期特性混频时会对建模产生较大影响,同时,真实信号与虚假信号难以分离也是建模预测的挑战之一。

GNSS时间序列建模预测方法的选择尤为重要。基于物理过程模型对水利设施监测点进行预测,会因物理过程表达不完善等问题导致局限;基于数理统计函数模型建模,虽然建模精度很高,但在实际应用中会产生过拟合失效等问题。随着人工智能的发展,部分学者尝试采用机器学习的方法结合历史数据建模进行预测,但高维数据会放大错误噪声,降低训练精度,最终影响预测精度。因此,如何根据水利设施监测点的实际情况建立高精度有效的预测模型是当下难题。

3.2 GNSS监测技术的局限性

自20世纪80年代以来,卫星定位技术在大坝、水库、输水干渠等水利工程安全监测中得到较为广泛且成功的应用。多次实践证明,GPS能够满足水利工程变形监测的精度需求。利用GNSS定位技术监测大坝的水平位移,2~4 h解的精度可达0.5~1.0 mm;利用GPS定位技术进行大坝的垂直位移监测,用2~4 h观测资料所确定的垂直位移的精度可优于1~1.5 mm。然而,由于对卫星定位技术的精度、工作特点以及应用局限认识有限,在不适用GNSS监测的区域作业或采用不科学的监测方案,使监测成果的精度和可靠性难以满足水利工程监测的规范要求。因此,本文从GNSS工程监测方案、终端、数据处理策略与软件以及资料存储方面进行了分析和讨论。

1)工程监测方案设计。良好的对天通视情况是实现高精度GNSS监测的先决条件。然而,水利工程安全监测应用中观测环境较为复杂,如大坝坝基处会受坝体遮挡、输水干渠和小型水库监测受植被遮挡影响等,如果盲目采用GNSS进行监测,将会导致监测精度和可靠性难以满足要

求。因此,实际应用中,首先需要对监测现场进行选点、勘察,科学设计 GNSS 监测技术方案,以确保测点观测环境能够满足实际监测的技术要求。在此基础上,还需要结合实地情况,对解算模型、策略等方面做出优化和调整,进一步提升 GNSS 监测的精度和可靠性。此外,即使已经建设了自动化监测系统,也需进行定期维护,如清理测站周围生长的植被等,保证 GNSS 测点的观测环境不发生大的变化,进而导致监测服务受影响。

2) 终端价格与定位能力。GNSS 终端的性能决定了其采集的观测数据质量,继而决定了最终变形监测的精度和可靠性。通常,为了全方位监测工程体的变形,应利用尽量多的终端,布设足够密度的监测网络。然而,高密度监测网的监测成本较高。近年来,针对不同监测应用场景,大量研究围绕成本、性能、功耗等技术指标开展。其中,普适性接收机方面研究较多,如低成本接收机^[29]、一机多天线^[30]、“云+端技术”^[31]等,对于需要大面积、高密度监测的区域,如水利工程周边的滑坡等,有很大的应用价值。然而,目前对于更高精度的应用场景(如混凝土坝坝体监测需要 1 mm 精度)下的 GNSS 终端研究相对不足。实际应用中,仍大量使用 Leica、Trimble 等进口品牌测量型接收机,成本较为昂贵。因此,GNSS 终端的成本和性能当前仍难以平衡。如果一味追求降低成本,无疑难以避免性能的降低。因此,有必要针对实际应用场景的需求,确保在监测性能、精度能够满足水利工程规范要求的前提下,研究更加经济适用、性能优良的 GNSS 监测终端,使卫星定位技术能够为水利工程提供更加优质、可靠的监测服务。

3) 数据处理方法与软件实现。在设计了科学的监测方案、采用了性能可靠终端的条件下,科学、合理地制定数据处理方法并实现,是获得高精度监测成果的关键。例如,对于高程差异大、多路径强的测点,可采用定制的对流层改正、多路径改正模型;对于观测遮挡相对严重的测点,可采用不同卫星系统的紧组合定位方法。上述误差修正模型构建、解算策略优化,以及最终在监测系统中实现,需要一定的人力和物力成本。然而,实际工程应用中容易出现“重硬件、轻软件”的观念和情况,部分情况下甚至会出现盲目地利用滤波技术来得到发散度较小的成果序列,使得监测成果与变形体真实的变形严重不

符,影响了卫星定位技术在水利工程监测领域的应用和推广。

4) 资料的保存。利用 GNSS 进行变形监测时,接收机采集的是包含观测值、导航电文等在内的原始观测数据,经过一系列数据处理后才能得到测点的坐标或变形信息。然而,随着 GNSS 的不断发展,可观测到的卫星数量、观测值类型逐渐增多,原始观测数据的数据量也在增大,导致数据存储所需要的空间和成本也不断增大。因此,当前一些工程监测中,一般选择只保存 GNSS 测点坐标或变形的成果文件,而放弃存储原始观测数据,这样可节约存储空间,尤其是在测点数量较多、监测年限较长时,成本节约较为明显。

然而,在处理 GNSS 原始观测数据的过程中,由于观测模型、解算方法及策略等选择的不同,也会造成解算精度的差异,甚至极端情况下会出现解算的错误,为后续基于变形时间序列的分析、预测等工作带来困扰。此时,利用当前更加优化的解算策略和模型对存储的 GNSS 原始观测数据重新进行解算,是获取更加精确、可靠的变形时间序列的有效途径。因此,有必要对关键测点的原始数据进行存储,以便于有需要时的数据重处理。

4 水利工程智能安全监测的思考与建议

近年来,随着大数据、人工智能、5G 等新兴技术的发展,多学科、多技术、多监测手段的交叉融合,为建设面向全过程(全生命周期)、全方位、全自动的水利工程智能安全监测系统提供了技术基础。然而,仍存在以下几大挑战^[32-34]:

1) 构建面向水利工程变形监测全过程的监测体系。水利工程全过程变形监测体系应从修建开始,包括精确变形确定、变形成因解释和分析评估决策等方面。在变形信息获取方面,构建以北斗/GNSS 为主要技术支撑的监测体系,继续深化北斗多系统紧组合融合解算,进一步实现水利工程“探微”;在变形成因解释方面,时间序列分析理论、人工智能、大数据分析理论的成熟发展,为精确分离各项荷载效应引起的变形提供了解决方案,深入挖掘水利工程可能的致灾因素与变形演化内在机理的联系,在分析评估决策方面,结合地理实体建模与智能构建相关理论,完善监测评价体系与预警机制,实现设计验证及结

构模型修正,损伤演化规律验证与发现,服役安全评定与预警和寿命预测。

2)搭建基于多源技术融合的多层次、全方位、智能化监测系统。单一技术手段在具体应用过程中,容易受到环境、设备、人员的影响,例如,地面监测技术需要测点间互相通视,卫星定位技术需要测站对天通视等,限制了其变形监测成果的可靠性。同时,单一技术手段往往只能满足完成特定层面、特定目标的变形监测需求,例如GNSS监测点位移、InSAR监测平面变形情况、三维激光扫描监测物体变形监测情况。因此,有必要采用天空地体多源技术融合,实现对水利工程结构点线面体的多层次、全方位、智能化监测。

3)打造多尺度集群化水利工程变形监测智慧服务平台。为实现水资源优化配置,往往需要统筹兼顾流域内所有水利工程^[32]。基于水利工程间的水文、水利关系,将互相独立的变形监测信息集群化,有利于全流域统一调度与决策,提高水资源利用效率。然而,即使在同一流域内,部分水利工程仍处于独立运行状态,变形监测等信息少有互通。因此,有必要以多尺度地理信息数据为基础,结合数据挖掘、人工智能等新兴技术,不仅监测某一流域(区域)所有的水利工程,而且可以监测这一流域(区域)的滑坡等自然灾害,然后对海量监测数据进行聚类分析、处理,实现水利工程全自动监测、集群化管理、智能决策。

尽管面向全过程、全方位、全自动的智能化监测面临不少挑战和机遇,但必将更好地服务于水利工程的智能运维。

参 考 文 献

- [1] Li Qingbin, Ma Rui, Hu Yu, et al. A Review of Intelligent Dam Construction Techniques[J]. *J Tsinghua Univ(Sci and Technol)*, 2022, 62(8): 1252-1269 (李庆斌, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8): 1252-1269)
- [2] Jia J. A Technical Review of Hydro-Project Development in China[J]. *Engineering*, 2016, 2(3): 88-109
- [3] Wang Hao. People's Daily: Water Conservancy Construction Supports Growing Agricultural Harvest (People's Current Review): "China's Vitality" in the Data [EB/OL]. (2022-08-31) [2022-09-15]. http://www.mwr.gov.cn/xw/mtzs/rmrb/202209/t20220906_1594804.html (王浩. 人民日报:水利建设支撑岁稔年丰(人民时评):数据里的“中国活力” [EB/OL]. (2022-08-31)[2022-09-15]. http://www.mwr.gov.cn/xw/mtzs/rmrb/202209/t20220906_1594804.html)
- [4] Zheng Shouren. Discussion of Safety Issues of Reservoir Dam in China [J]. *Yangtze River*, 2012, 43(21): 1-5 (郑守仁. 中国水库大坝安全问题探讨[J]. 人民长江, 2012, 43(21): 1-5)
- [5] Wang Jian, Wang Shijun. Investigations on Reservoir Dam Safety Monitoring in China and Measure Study[J]. *China Water Resources*, 2018(20): 15-19 (王健, 王士军. 全国水库大坝安全监测现状调研与对策思考[J]. 中国水利, 2018(20): 15-19)
- [6] Li Hongen, Ma Guizhen, Wang Fang, et al. Analysis of Dam Failure Trend of China from 2000 to 2018 and Improvement Suggestions [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(5): 101-111 (李宏恩, 马桂珍, 王芳, 等. 2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 101-111)
- [7] Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources. Technical Specification for Concrete Dam Safety Monitoring: SL 601-2013 [S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2013 (水利部大坝安全管理中心. 混凝土坝安全监测技术规范: SL 601-2013 [S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2013)
- [8] Ning Jinsheng, Yao Yibin, Zhang Xiaohong. Review of the Development of Global Satellite Navigation System [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, 1(1): 3-8 (宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8)
- [9] Li Zhenghang, Xu Shaoquan. Application of GPS to Deformation Monitoring [J]. *Journal of Geomatics*, 2002, 26(3): 32-35 (李征航, 徐绍铨. 全球定位系统(GPS)技术的最新进展第三讲GPS在变形监测中的应用[J]. 测绘信息与工程, 2002, 26(3): 32-35)
- [10] Jiang Weiping, Liu Jingnan. Application of GPS Technology in Geheyan Dam Monitoring [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 1998, 23(S): 20-22 (姜卫平, 刘经南. GPS技术在隔河岩大坝监测中的应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(增刊): 20-22)
- [11] Jiang Weiping, Liu hongfei, Liu Wanke, et al. CORS Development for Xilongchi Dam Deformation Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 949-952 (姜卫平, 刘鸿飞, 刘万科, 等. 西龙池上水库GPS变形监测系统研究及实现[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(8): 949-952)

- [12] Rene Vazquez-Ontiveros J, Martinez-Felix C A, Esteban Vazquez-Becerra G, et al. Monitoring of Local Deformations and Reservoir Water Level for a Gravity Type Dam Based on GPS Observations[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 319-330
- [13] Teunissen P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1/2): 65-82
- [14] Zhang qin, Huang Guanwen, Yang Chengsheng. Precision Space Observation Technique for Geological Hazard Monitoring and Early Warning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1300-1307(张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1300-1307)
- [15] Webb S R, Penna N T, Clarke P J, et al. Kinematic GNSS Estimation of Zenith Wet Delay over a Range of Altitudes[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(1): 3-15
- [16] Gumus K, Selbesoglu M O. Evaluation of NRTK GNSS Positioning Methods for Displacement Detection by a Newly Designed Displacement Monitoring System[J]. *Measurement*, 2019, 142: 131-137
- [17] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Li Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407(张小红, 李星星, 李盼. GNSS精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407)
- [18] Li M, Huang G, Wang L, et al. Performance of Multi-GNSS in the Asia-Pacific Region: Signal Quality, Broadcast Ephemeris and Precise Point Positioning (PPP) [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3028
- [19] Yan Z, Zhang X. The Performance of Three-Frequency GPS PPP-RTK with Partial Ambiguity Resolution[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(7): 1014
- [20] Strange W. GPS Determination of Groundwater Withdrawal Subsidence [J]. *Journal of Surveying Engineering Asce*, 1989, 115(2): 198-206
- [21] Hudnut K W, Behr J A. Continuous GPS Monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California [J]. *Seismological Research Letters*, 1998, 69(4): 299-308
- [22] Carla T, Tofani V, Lombardi L, et al. Combination of GNSS, Satellite InSAR, and GBInSAR Remote Sensing Monitoring to Improve the Understanding of a Large Landslide in High Alpine Environment[J]. *Geomorphology*, 2019, 335: 62-75
- [23] Xu Shaoquan, Cheng Wenming, Huang Xuebin, et al. The Investigation of the Landslides Monitoring in the Three Gorges Reservoir Region by Applying GPS [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(1): 114 - 118 (徐绍铨, 程温鸣, 黄学斌, 等. GPS用于三峡库区滑坡监测的研究[J]. 水利学报, 2003(1): 114-118)
- [24] Wang Li, Zhang qin, Guan Jian'an, et al. Experiment Results and Analysis of the Dynamic Deformation Monitoring of a Kind of Landslide Based on GPS Technology[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 422-426 (王利, 张勤, 管建安, 等. 基于GPS技术的滑坡动态变形监测试验结果与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 422-426)
- [25] Yuan Youcang, Gong Jing, Wang Yin. Application of BeiDou+GPS Double System in High Slope Safety Monitoring of Changheba Hydropower Station [J]. *Sichuan Water Power*, 2013, 32(4): 112-116 (袁有仓, 龚静, 王颖. 北斗+GPS双星系统在长河坝水电站高边坡安全监测中的应用[J]. 四川水力发电, 2013, 32(4): 112-116)
- [26] Xu shaoquan, Li Zhenghang, Liu Jingnan, et al. Reliability Analysis of GPS Automatic Monitoring System for Geheyan Dam Appearance Deformation[J]. *GNSS World of China*, 2000(1): 25 - 28 (徐绍铨, 李征航, 刘经南, 等. 隔河岩大坝外观变形GPS自动化监测系统的可靠性分析[J]. 全球定位系统, 2000(1): 25 - 28)
- [27] Jiang Weiping, Liu Hongfei, Zhou Xiaohui, et al. Analysis of Long-Term Deformation of Reservoir Using Continuous GPS Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 682-689 (姜卫平, 刘鸿飞, 周晓慧, 等. 利用连续GPS观测数据分析水库长期变形[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 682 - 689)
- [28] Wang Chuan, Yang Shanshan, Dong Zerong, et al. The Engineering Application About GNSS Monitoring System in Xiaowan Arch Dam Safety Monitoring [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2013, 37(1): 63-67 (王川, 杨姗姗, 董泽荣, 等. GNSS监测系统在小湾拱坝安全监测中的应用 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2013, 37(1): 63-67)
- [29] Odolinski R, Teunissen P J G. Single-Frequency, Dual-GNSS Versus Dual-Frequency, Single-GNSS: A Low-Cost and High-Grade Receivers GPS-BDS RTK Analysis [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11): 1255-1278
- [30] He X, Jia D, Sang W. Monitoring Steep Slope

- Movement at Xiaowan Dam with GPS Multi-Antenna Method [J]. *Survey Review*, 2011, 43(323): 462-471
- [31] Bai Zhengwei, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Real-Time BeiDou Landslide Monitoring Technology of "Light Terminal Plus Industry Cloud"[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(11): 1424-1429 (白正伟, 张勤, 黄观文, 等. "轻终端+行业云"的实时北斗滑坡监测技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(11): 1424-1429)
- [32] Wang Hao, Wang Xu, Lei Xiaohui, et al. The Development and Prospect of Key Techniques in the Cascade Reservoir Operation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 25-37 (王浩, 王旭, 雷晓辉, 等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 25-37)
- [33] Zhong Denghua, Shi Mengnan, Cui Bo, et al. Research Progress of the Intelligent Construction of Dams [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 38-52 (钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 38-52)
- [34] Zhong Denghua, Ren Bingyu, Song Wenshuai, et al. Study on Key Techniques for Intelligent Control of Construction Progress and Quality of High Arch Dam and Their Applications [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(8): 8-17 (钟登华, 任炳昱, 宋文帅, 等. 高拱坝建设进度与质量智能控制关键技术及其应用研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 8-17)

Progress and Thoughts on Application of Satellite Positioning Technology in Deformation Monitoring of Water Conservancy Projects

JIANG Weiping¹ LIANG Yuhan¹ YU Zaikang² XIAO Yugang³
CHEN Yan¹ CHEN Qusen¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Guizhou Dam Safety Monitoring Center, Guiyang 550002, China

³ Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co. Ltd(Wuhan), Wuhan 430010, China

Abstract: Deformation monitoring is an important guarantee for the safe operation of water conservancy projects. With the advantages of high precision, all-day and all-climate observation, global satellite navigation system (GNSS) provides new means for deformation monitoring in hydraulic engineering. At present, the deformation monitoring technologies represented by satellite positioning is approaching intelligent development in all processes, all aspects, and all autonomous. Firstly, we focus on the demand of deformation monitoring of water conservancy projects, and review the development of deformation monitoring technology. Then, the application of GNSS deformation monitoring in hydraulic engineering is introduced. Besides, the difficulties and limitations of GNSS deformation monitoring application are discussed. Finally, the development direction of intelligent GNSS deformation monitoring in hydraulic engineering in the future is prospected.

Key words: GNSS; deformation monitoring; water conservancy projects; intelligent monitoring

First author: JIANG Weiping, PhD, professor, specializes in theory of satellite geodesy and its engineering applications. E-mail: wpjiang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (41525014); the Program for Hubei Provincial Science and Technology Innovation Talents (2022EJD010); the National Natural Science Foundation of China (42004017); Special Fund for Wuhan Knowledge Innovation Program (2022010801010107).

引文格式: JIANG Weiping, LIANG Yuhan, YU Zaikang, et al. Progress and Thoughts on Application of Satellite Positioning Technology in Deformation Monitoring of Water Conservancy Projects [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1625-1634. DOI:10.13203/j.whugis20220589 (姜卫平, 梁娱涵, 余再康, 等. 卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(10): 1625-1634. DOI:10.13203/j.whugis20220589)