

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

北斗系统在水利工程安全监测中的适用性思考

刘岩, 侯文昂, 杜镇瀚, 黄健峰

Considerations on the applicability of the BeiDou System in hydraulic engineering safety monitoring

LIU Yan, HOU Wenang, DU Zhenhan, HUANG Jianfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20241009002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国水库大坝安全监测现状深度剖析与对策研究

Detailed analysis and countermeasure research on the present situation of reservoir dam safety monitoring in China
水利水电工程学报. 2021(6): 97 <https://doi.org/10.12170/20210301001>

基于北斗卫星导航系统的大坝静动力变形监测

Dam static and dynamic deformation monitoring based on BeiDou Satellite Navigation System
水利水电工程学报. 2022(3): 34 <https://doi.org/10.12170/20220115001>

水工程安全监测智能化面临的挑战、目标与实现路径

Intelligent water engineering safety monitoring: challenges, goals and roadmap
水利水电工程学报. 2021(6): 103 <https://doi.org/10.12170/20201210003>

PFMA在混凝土面板堆石坝安全监测优化布置中的应用

Application of PFMA in safety monitoring of concrete face rockfill dams
水利水电工程学报. 2021(2): 124 <https://doi.org/10.12170/20201120001>

水利工程白蚁防治研究进展

Review on of termite control in water conservancy projects
水利水电工程学报. 2024(3): 1 <https://doi.org/10.12170/20240114004>

水库与水电站大坝安全评价体系对比研究

A comparative study on dam safety evaluation systems for reservoirs and hydropower stations
水利水电工程学报. 2024(2): 154 <https://doi.org/10.12170/20230202001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20241009002

刘岩, 侯文昂, 杜镇瀚, 等. 北斗系统在水利工程安全监测中的适用性思考 [J]. 水利水运工程学报, 2024(6): 169-176. (LIU Yan, HOU Wenang, DU Zhenhan, et al. Considerations on the applicability of the BeiDou System in hydraulic engineering safety monitoring[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(6): 169-176. (in Chinese))

北斗系统在水利工程安全监测中的适用性思考

刘 岩¹, 侯文昂^{2,3,4}, 杜镇瀚³, 黄健峰³

(1. 黄河古贤水利枢纽有限公司, 河南 郑州 450018; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029; 3. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 北斗系统(BDS)是中国自主研发的全球卫星导航系统, 具有全球覆盖、短报文通信、实时定位等优点, 近年来北斗系统在水利工程安全监测有了一定应用, 但也受到了如精度不满足需求、解算成果不可靠等质疑。基于水利工程安全监测需求和北斗系统优势, 梳理了北斗系统技术特点, 分析了北斗系统在水利工程安全监测领域的适用性、优势及局限性, 指出北斗系统在水利工程安全监测中的应急通讯、表面变形趋势监测等方面具有巨大应用潜力。通过加强解算能力、多传感器融合计算等方式, 可发挥北斗系统在水利一张图、库容监测、表面变形监测等水利工程安全监测场景的作用, 应加强其在水利工程安全运行管理中的理论研究和实践应用。

关键词: 北斗系统; 水利工程; 水库; 堤防; 安全监测; 适用性分析

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)06-0169-08

21 世纪以来, 随着经济的高质量发展, 中国水利工程从建设向运行管理转变、从工程管理向风险管理转变、从单一工程向系统体系(上下游、左右岸、干支流)转变^[1-2]。受全球气候变化加剧影响, 极端暴雨事件频发, 2000 年以来突发性暴雨洪水导致漫顶溃坝事故比例显著上升, 严重威胁水库大坝、堤防、水闸等水利工程的安全^[3-5]。加强水利工程安全管理, 特别是监测工作, 是水利工程长期安全运行的技术保障和管理支撑, 是实现现代化水库运行管理矩阵建设和推进水利工程现代化管理的战略需求。当前中国水库大坝基本为土石坝、重力坝和拱坝, 这些大坝主要采用传统的监测手段和仪器设备, 已不能适应水利工程现代化管理的需求。近年来, 中国学者针对北斗系统在水利设施中的应用开展了相关研究。范明杰等^[6]研究了基于北斗系统的水库大坝静态和动态变形监测, 分析了传统光学观测方法与北斗监测技术的差异, 并结合工程实例验证了北斗系统在地震作用下大坝表面变形监测的可行性; 杨嘉俊等^[7]通过北斗网格码技术, 对河湖水体和周边涉水建筑的进行精确定位、监测与管理, 显著提升智慧水利系统的数据处理效率和空间定位精度; 赖亮^[8]基于北斗与 InSAR 技术构建了水库监测系统, 验证其可以有效解决表面变形的短板并提升监测效率; 徐章耀^[9]在白龟山水库构建了基于北斗卫星和 GSM 信道的水雨情测报系统, 通过双信道传输增强了系统在极端天气和通信中断条件下的稳定性和可靠性。

尽管中国北斗卫星导航系统(BeiDou Satellite Navigation System, 简称北斗系统 BDS)在大坝外部变形监测的已有试用过程中发现存在精度不足、解算成果不可靠等问题, 但北斗系统可全天候全要素地开展大坝安全监测工作, 在国产化改造的大背景下, 充分挖掘 BDS 在水利工程监测中的适用性十分重要。本文针对全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)尤其是北斗系统在水利工程安全监测领域的适用性开展调查分析, 归纳北斗系统技术特点, 分析北斗系统在水利工程安全监测领域的适用性、优势及

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3005400); 国家自然科学基金资助项目(41671504); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y724007, Y724010)

作者简介: 刘 岩(1974—), 男, 辽宁昌图人, 高级工程师, 主要从事水利工程建设与运行管理工作。

E-mail: shan8wai8shan@163.com 通信作者: 侯文昂(E-mail: wahou@nhri.cn)

局限性,为健全完善北斗系统在水利工程安全监测领域的政策支撑、管理制度和技术标准体系提供参考。

1 北斗系统技术特点

1.1 北斗卫星导航系统发展

北斗系统是中国自行研制的全球卫星导航系统^[10],也是继全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、伽利略卫星导航系统之后的第3个成熟的卫星导航系统^[11]。北斗系统由空间段、地面段和用户段等3个部分组成,可在全球范围内全天候、全天时提供高精度的定位、导航、授时服务,并且具备短报文通信能力^[12-13]。2023年12月26日,发射第57颗、58颗北斗导航卫星,是中国北斗三号全球卫星导航系统建成开通后发射的首组MEO卫星,在全球短报文通信容量、星载原子钟技术、有效载荷智能化等方面,对支撑系统稳定运行和规模化应用具有重要意义,为下一代北斗卫星的设计奠定了基础^[14]。

1.2 北斗卫星导航系统工作原理

北斗卫星进行导航定位的基本原理为:利用北斗卫星已知的空间位置、卫星至定位终端的距离信息,通过距离交会方程解算获得用户位置^[13,15]。根据定位方式,可以分为绝对定位与差分定位。绝对定位是指:当用户接收到导航电文时,提取出卫星时间信息,将卫星时间与接收端时钟对比后,系统即可推算卫星与用户的距离,综合北斗卫星的数据可由最小二乘法计算接收机具体位置。绝对定位的定位精度为米级,常见的应用领域包括车辆导航、手机定位等^[11]。差分定位是指:通过北斗卫星间、地面定位终端间等差分算法,消除接收机钟差、卫星钟差的同时,削弱大气误差影响,采用最小二乘法或卡尔曼滤波实现相对位置估计^[16]。相对定位精度受接收机性能、站间距离、观测时长等影响,精度可以达到分米级、厘米级甚至毫米级。

1.3 北斗卫星导航系统的技术优势分析

作为中国自主建设和运营的系统,北斗系统不依赖于其他国家的系统,保障了中国在卫星导航领域的自主权 and 安全性。相比于其他定位手段,北斗系统主要有覆盖范围广、短报文通讯能力、实时定位、受天气环境影响小及统一坐标系等技术优势(表1)。

表1 北斗系统的技术优势

Tab. 1 Technical advantages of the BeiDou System

优势点	技术实现	对水利工程的意义
自主研发	实现自主建设和运营	避免国外全球定位系统停用给水利工程运行管理过程可能造成的不利影响,意义重大,也是国产化改造的重要组成部分
覆盖范围广	北斗系统覆盖全球,没有通讯盲区,天空无遮挡/弱遮挡区域都可实现定位	适合大尺度数据采集及数据监控管理
短报文通讯能力	北斗系统除可以提供定位服务外,也可以提供短报文通讯服务,无需移动网络便可实现数据传输	在野外、偏远山区等移动网络无法覆盖的区域可以发挥重要作用
实时定位	与传统测量定位手段相比,北斗系统可以提供24小时不间断的实时定位,定位的实时响应程度高	对掌握汛期水利工程实时安全动态具有重要意义
受天气环境影响小	北斗系统测量过程中,基准点与监测点无需通视,因此测量过程与测量精度几乎不受光线与天气影响	为汛期水库、大坝的实时监测提供有效手段
统一坐标系	北斗系统坐标系统为CGCS2000坐标系,北斗系统的测量结果均为GCS2000坐标系下成果	对分析水利工程形变过程,实现水利工程、船舶、无人机、浮标等协同定位与实现水利数字孪生具有重要意义

2 北斗系统对水利工程安全监测适用性分析

2.1 适用性场景分析

BDS在水利工程安全监测领域的适用性场景比较丰富,主要包括水利工程常规监测、重点风险工程监测及预警预报等其他场景(图1)。

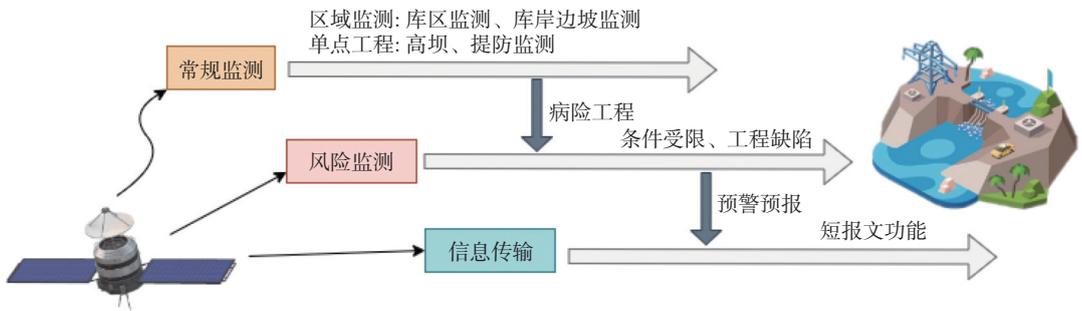


图1 北斗系统在水利工程中的应用场景

Fig. 1 Application scenarios of the BeiDou System in hydraulic engineering

2.1.1 水利工程常规监测 常规监测主要包括以下4个方面。一是区域监测。利用BDS开展水利工程所在区域的大地变形测量,或流域内各水利工程点多、面广、量大的监测工作。二是高坝和圉工坝监测。与中低坝相比,高坝变形量相对较大,BDS的测量精度已能满足要求;混凝土坝和浆砌石坝等圉工结构坝的水平向变形更受重视,这些圉工刚性结构坝的水平位移也可采用BDS监测,但须同时配备其他满足规范要求的监测方法进行监测。三是堤防或坝线长的水利工程安全监测。无需考虑校核基点和工作基点的配合测量问题,采取BDS仅需配合分析即可。四是库岸边坡监测。精度要求不高,变形较大,趋势变化比较明显,适合采用BDS。

2.1.2 危险性高的水利工程 对于测量风险较大的项目,可采用BDS。一是高风险水库安全监测。对于下游风险体量大且重要的水库,一旦溃坝可能影响下游城市或重要基础设施,造成极大社会影响,这类工程从加强变形监测的角度考虑,可以采用BDS加强自动监测能力和水平。二是对已发现工程缺陷需要加密连续观测的工程。经过专家现场检查和专业判断,水利工程某部位存在缺陷,需要开展不间断的连续监测,此时采用传统的人工监测手段将耗费相当大的人力物力,如采用替代的BDS手段进行监测,可以满足连续监测需求。三是安全监测条件不具备人员监测条件的工程。有些水利工程处于边远山区、有的水库大坝坝线很长、堤防的长度往往也都比较长,对这些水利工程进行定期安全监测若全部依靠人工则几乎不可能,利用BDS可以配合和加密人工监测工作,一定程度上解决这一问题。但自动化监测无法完全代替人工监测,自动化监测只是人工监测的一种辅助手段。

2.1.3 其他场景 BDS还可应用于以下场景。一是预警服务。预警条件不按照阈值判别,而根据基于BDS变形监测量值的变化趋势进行预警,例如采用BDS监测水库大坝某个测点表面变形量不断增大,需要及时预警;当发生山洪灾害时,公网中断、地面网络信号较弱等多种原因可能造成监测信息无法及时回传,BDS特有的短报文功能,可以在普通移动通信信号不能覆盖的地区或通信基站遭受破坏的情况实现双向通信,从而实现灾情信息的及时上报。二是地形信息测量与校验。通过BDS定位功能和遥感技术的地形信息提炼技术,可以非常快速、准确地获取水库上下游地形信息,为水库调洪演算和水库泄洪洪水演进分析提供基础。通过BDS的定位功能,结合地形遥感技术,快速完成库区地形图测量工作,为水库库容曲线提供准确信息。三是部分地区积极主动要求BDS试点。全国小型水库管理体制改革样板县、经济条件好且安全要求高的区域等,对水利工程安全监测特别重视,进行BDS试点的积极性会比较高,可以先行先试,积累经验。四是补充监测手段。有的水库常规变形监测可能1个月甚至更长的时间才能开展1次,在这种情况下,BDS是一种很好的补充监测手段,能够在人工测量缺失的时间段提供粗略的水库结构安全性态。

2.2 优势分析

BDS在水利工程监测中具有以下优势。

(1)实时监测。BDS是自动监测,可以设置高密度的监测频率,对需要重点监测的部位或需实时监测的场景特别适合。

(2)定位服务。BDS 定位精度可以达到厘米级,对于无人机智能巡检定位服务、机器狗巡检定位、无人船巡检定位,采用 BDS 十分理想且能满足需求。杨嘉俊等^[7]通过 BDS 对河湖和水库库区涉水建筑进行精确定位,可显著提升水库库区智慧管理和空间定位精度及数据处理问题。

(3)通信功能。水利工程突发事件情况下,紧急通信极其重要,但也容易受到极端天气的影响。如溃坝事故,在紧急情况应对过程中都不同程度地遇到过因通信能力变弱而无法进行信息共享与有效沟通的情况,一定程度上影响应急响应与处置工作。BDS 通信能力强,可以为水利工程紧急情况下的通信提供技术支撑,也可以为边远山区水利工程安全监测通信工作提供支撑。徐章耀^[9]在白龟山水库构建了基于北斗卫星和 GSM 信道的水雨情测报系统,进一步增强了系统稳定性。

(4)变形量监测。BDS 监测值是相对地球地心的,地球表面的水利工程变形监测量值是基于地心的,因此 BDS 监测的变形量相对而言是绝对值,不需要找校核基点和工作基点作为参照物,这利于水利工程的变形分析,因为很多水利工程的校核基点和工作基点的位置坐标并不准确,有的甚至是假定坐标。对于这类工程,采用 DBS 进行外部变形监测是比较好的解决方案。

(5)设备安装条件不高。BDS 对安装环境要求不高,特别是传统光学设备有视线遮挡等情况的,利用传统光学可能不能完成通视的,可以采用 BDS 监测。

(6)受环境影响小。恶劣天气是造成水利工程发生安全事故或突发情况的重要原因,传统监测手段往往受制于水利工程运行环境,天黑、暴雨、大雾等极端天气条件下,传统监测难以开展,而 BDS 不受这些因素影响。

2.3 局限性分析

虽然 BDS 在水利工程监测中具有上述优势,但依然存在如下方面的不足。

(1)运行维护。BDS 作为专业设备,基层水利管理人员对其运行维护比较困难,在实践中常常发现一些简单的设备错误都需要专业人员进行运维,运维费可能超过设备本身的费用,对于面广量大的小型水库而言是不经济的。

(2)解算能力。采用 BDS 需要实时将监测数据传到有解算能力的专业机构,或者提供专业的解算软件,解算能力如何配合水利工程安全监测工作等问题都会提高成本,可能会阻碍北斗系统在水利工程安全监测领域的应用发展。

(3)性价比问题。按照 BDS 监测体系框架,需要针对水利工程变形监测工作,补充设置必要的测站;对 BDS 监测设施进行日常运行维护;对 BDS 的监测数据进行专业解算。这些都将增加成本,对于中小型水利工程而言是难以承受的。

(4)精度不足。这是 BDS 当前的主要缺陷,也是各大标准规范修订过程中将 BDS 监测手段纳入变形监测中受到的主要质疑点。表 2^[17-18]整理了现行规范中水利设施变形监测位移误差限值,尽管设备厂商宣传 BDS 的监测精度达到毫米级甚至 1 mm 内,但是实际应用发现水平位移的监测误差达 5 mm 甚至更多,垂直向精度更低,这对年变形量小于 5 mm 的大量运行时间超过 30 年的土石坝是不可接受的,尤其是对土石坝的变形监测(以垂直位移为主)。这类情况可以考虑 BDS 和 InSAR 相结合的方法,前者善于水平向变形监测,后者善于垂直向变形监测,这也是今后 BDS 应用发展方向。

表 2 水利设施变形监测位移量误差限值

Tab. 2 Displacement error limits for deformation monitoring of hydraulic facilities

监测项目	水平位移/mm		垂直位移/mm		倾斜/(°)		接缝和裂缝开合度/mm
	坝体	坝基	坝体	坝基	坝体	坝基	
土石坝	±3.0		±3.0		无		±1.0
重力坝、支墩坝	±1.0	±0.3	±1.0	±0.3	±5.0	±1.0	±0.2
拱坝	径向:±2.0,切向:±1.0	径向:±0.3,切向:±0.3	±1.0	±0.3	±5.0	±1.0	±0.2

(5)无法开展内部监测。北斗系统主要测量表面变形,对坝体内部应力、内部变形、渗透压力、渗漏量等无法测量,而这些指标也是水库大坝安全监控必须的项目。

2.4 与其他监测设施设备的比较分析

2.4.1 监测范围 北斗系统的覆盖范围广且不受地理位置的限制,适用于偏远山区水利工程,而传统设备覆盖范围相对有限,对于尺度较大的水利工程难以全面监测。现阶段多将北斗系统用于大范围的全局宏观监测,在发现异常情况时,利用传统设备进行更详细的现场勘察与验证,用以精准定位与分析问题。

2.4.2 工作环境适应性 北斗系统不受气候条件影响,可以适应各种极端气候环境,实现实时监测及预警,而传统设备受环境因素影响较大,数据扰动误差大,且大多数设备无法做到实时数据传输,需要定期人工采集,实时性较差。

2.4.3 技术准确性 北斗系统在水利系统的应用时间较短,能否准确应对长时效性问题还需进一步验证,且一般需要专业技术人员操作维护,技术门槛较高,而传统设备在长时间发展及验证中技术体系已经成熟,应用更加广泛,但采集频率的限制可能难以及时发现工程中存在的问题。因此需要定期利用传统设备对北斗系统的数据进行校准和验证,确保数据的准确性和可靠性,防止系统漂移或误差累积。还需对技术人员进行培训,使其掌握北斗系统和传统设备的操作和维护,确保两者协同工作。

2.5 北斗系统和全球定位系统的比较分析

BDS与全球定位系统最突出的特点是,BDS为中国国产技术研发的产品,可避免特殊情况如全球定位系统(如GPS)不能使用带来的问题。此外,在技术层面还有如下优势。

(1)短报文通信。北斗系统具备独特的短报文通信功能,允许在不依赖地面通信网络的情况下,通过卫星发送和接收短消息。在极端气候条件引发水工程灾害时,BDS能提供关键的通信支持,施工人员可以借助其发送紧急报告或接收指示,实现双向通信。这一功能对水利工程紧急情况下的应急通讯十分重要,因为水利工程往往距离城镇远、发生突发险情时环境恶劣(狂风暴雨等天气),决策人员不能及时掌握现场险情,无法进行科学研判。历史发生的溃坝或者水库出险案例中,有很多案例就是由于险情信息不能及时传输而导致现场和指挥部信息不对称,影响了应急响应与处置的及时性。BDS短报文通信手段有效解决了这一难题。

(2)区域信号增强。除了全球覆盖,北斗系统还提供亚太地区的区域增强服务,通过地基增强系统(GBAS)和星基增强系统(SBAS)提高国内及亚太地区的定位精度。在国内的河流治理、水利工程建设及水灾害预警预报中,北斗系统的高覆盖率和高精度定位能显著提升工程质量和预警水平。

(3)多频段信号传输。北斗系统采用B1I、B1C、B2a、B2b等多频段信号传输,是全球第一个提供三频信号服务的卫星系统。通过在不同频率上传输信号,可以测量和校正电离层对信号的影响,从而提高定位精度和抗干扰能力,增强了系统的可靠性和适用性。

(4)双向定位。北斗系统具备独有的双向定位功能,终端不仅可以接收卫星信号,还可以发送信号到卫星,卫星接收并处理这些信号,然后将用户位置计算结果返回到用户终端。发生洪水灾害时,受困人员可以通过北斗系统的双向通信功能发送自己的位置信息,救援队伍能够快速准确地定位受困人员并实施救援。

3 北斗系统在水利工程安全监测应用展望

综上所述,BDS在水利工程安全监测中的应用前景良好,具体包括如下方面。

(1)变形监测具有更多可能。在安全监测领域,基于北斗系统的形变监测可以达到水平2 mm、高程5 mm的准实时监测精度,满足部分水利工程的安全监测。此外,北斗系统具有诸多优点:全天候实时监测、测量精度不受天气(如雨、雪、雾霾)影响,为汛期水库、大坝的实时监测提供有效手段;自动化程度高,实现了数据采集、数据处理、数据分析、监测预警一体化作业,减少人为因素引起的误差。因此,综合考虑国家

战略和行业发展,需充分发展 BDS 在水利工程安全监测领域中的应用。

(2)切实提高北斗监测实时解算能力。当前 BDS 的监测在桥梁领域可以做到实时解算,也可以 1 天 1 次解算,解算的时效性与解算精度相关,因为精度与解算时利用历史数据的充分程度和历史数据的支持程度有关。但对于水利工程安全监测而言,不能简单以解算精度来确定解算时效要求,应当从监测数据反映工程安全性的严重程度来考虑,对于变化趋势显示有恶化迹象的情况,不能仅 1 天 1 次解算,要实时解算与 1 天 1 次解算配合。

(3)智慧水利“一张图”构建。智慧水利、水利信息化的难点在于坐标系的不统一,北斗系统采用 CGCS2000 坐标系,基于北斗系统的变形监测、安全巡检(无人机、无人船、巡检机器人)、水位监测、船舶导航等,具有坐标系统一的优点,为实现智慧水利一张图、水利数字孪生提供重要的位置信息。

(4)多传感器集成融合。作为安全监测的传感器之一,北斗形变监测设备相对独立,将北斗监测设备与温度传感器、风力传感器等多种传感器联合作业,实现多传感器数据汇总与融合,对提高水库大坝安全监测效率具有重要意义。

4 结 语

本文基于水利工程安全监测需求和北斗系统优势,梳理了北斗系统技术特点,分析了北斗系统在水利工程安全监测领域的适用性、优势及局限性,得到以下主要结论。

(1)客观对待 BDS 在水利工程安全监测领域的应用。一方面不夸大北斗系统在水利工程安全监测中的作用,BDS 不仅不是万能的,当前的技术水平还存在大量的局限性,尤其是变形监测领域,不能完全依赖自动化监测;另一方面不能简单因为一些不足而全盘否定北斗系统在水利工程安全监测领域的作用,缺陷之处可以通过其他途径研究解决。

(2)加强 BDS 在水利工程安全监测领域的应用研究。BDS 与传统大坝安全监测手段相互补充,是传统大坝安全监测手段的延伸,应加强其在水利工程安全监测中的应用。每一类水利工程都具有鲜明的特点,应开展相应具体研究,如提高 BDS 在水利工程安全监测中精度的技术方法、基于 BDS 的水利工程安全监测预警技术、基于 BDS 的水库大坝突发事件应急通信技术研究、基于 BDS 的水库上下游大范围地形测量校验技术研究(库容曲线、下游行洪区)、基于 BDS 和遥感的水库淤积实时监测技术研究等。

(3)尽快结合 BDS 和水利工程安全监测行业发展需求,以传统大坝安全监测体系和手段为基础,深入开展基于 BDS 的水利工程安全监测研究,融合传统手段和 BDS 监测方法,加强基于 BDS 监测数据的解算能力,加强 BDS 和传统监测手段如垂线、外部变形等系统监测结果的互相验证,选择有代表性的水利工程开展示范应用。

(4)修编现有水利工程安全监测相关法规制度和技术标准时,考虑一定的 BDS 元素,明确 BDS 的使用场景和使用范围,尤其是耐久性和稳定性两项指标的监测技术手段,避免同一种技术测量极差过大,既充分利用新技术,又避免过度使用影响监测目标的实现。

参 考 文 献:

- [1] 陈祖煜,杨峰,赵宇飞,等. 水利工程建设管理云平台建设与工程应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(1): 1-6. (CHEN Zuyue, YANG Feng, ZHAO Yufei, et al. Construction and application of the cloud platform for water conservancy engineering management[J]. Water Resources and Hydropower Engineering Technology, 2017, 48(1): 1-6. (in Chinese))
- [2] JIA J S. A technical review of hydro-project development in China[J]. *Engineering*, 2016, 2(3): 302-312.
- [3] 新华社. 习近平对湖南岳阳市华容县团洲垸洞庭湖一线堤防发生决口作出重要指示 要求全力开展抢险救援工作 切实保

- 护好人民群众生命财产安全[EB/OL]. (2024-07-06) [2024-10-01]. http://www.qsttheory.cn/yaowen/2024-07/06/c_1130175486.htm. (Xinhua News Agency: Xi Jinping issued important instructions on the breach of the frontline dike in Huarong County, Yueyang City, Hunan Province, requiring full efforts in rescue and relief work to protect the safety of people's lives and property[EB/OL]. (2024-07-06) [2024-10-01]. http://www.qsttheory.cn/yaowen/2024-07/06/c_1130175486.htm.(in Chinese))
- [4] 张士辰,李宏恩. 近期我国土石坝溃决或出险事故及其启示[J]. 水利水运工程学报, 2023(1): 27-33. (ZHANG Shichen, LI Hongen. Recent earth-filled dam failures or accidents of reservoirs in China and their enlightenment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 27-33. (in Chinese))
- [5] 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. (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. (in Chinese))
- [6] 范明杰,李卓. 基于北斗卫星导航系统的大坝静动力变形监测[J]. 水利水运工程学报, 2022(3): 34-40. (FAN Mingjie, LI Zhuo. Dam static and dynamic deformation monitoring based on BeiDou Satellite Navigation System[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(3): 34-40. (in Chinese))
- [7] 杨嘉俊,任伏虎,司艳红. 北斗网格码在广东智慧水利建设中的应用[J]. 广东水利水电, 2021(11): 30-36. (YANG Jiajun, REN Fuhu, SI Yanhong. Application of BeiDou grid code in Guangdong smart water conservancy construction[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(11): 30-36. (in Chinese))
- [8] 赖亮. 基于北斗及InSAR的水库监测系统与安全评价研究[J]. 云南水力发电, 2023, 39(1): 83-86. (LAI Liang. Research on reservoir monitoring system and safety evaluation based on BeiDou and InSAR[J]. Yunnan Hydropower, 2023, 39(1): 83-86. (in Chinese))
- [9] 徐章耀. 基于北斗卫星通信信道的水雨情测报系统在白龟山水库的应用[J]. 水资源开发与管理, 2017(6): 31-34, 13. (XU Zhangyao. Application of hydrological and rainfall monitoring system based on BeiDou satellite communication channel in Baigui Mountain Reservoir[J]. Water Resources Development and Management, 2017(6): 31-34, 13. (in Chinese))
- [10] 杨子辉,薛彬. 北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势[J]. 导航定位学报, 2022, 10(1): 1-14. (YANG Zihui, XUE Bin. Development history and future trends of the BeiDou satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(1): 1-14. (in Chinese))
- [11] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6. (YANG Yuanxi. Progress, contributions, and challenges of the BeiDou satellite navigation system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6. (in Chinese))
- [12] 蔡洪亮,孟轶男,耿长江,等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 427-435. (CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. Performance evaluation of the BeiDou-3 global navigation satellite system: Positioning, navigation, timing, space-based augmentation, precise point positioning, short message communication, and international search and rescue[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 427-435. (in Chinese))
- [13] 杨元喜,李金龙,王爱兵,等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 72-81. (YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary evaluation of the basic navigation positioning performance of the BeiDou regional satellite navigation system[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(1): 72-81. (in Chinese))
- [14] 北斗网: 我国成功发射第五十七颗、五十八颗北斗导航卫星. [EB/OL]. (2023-12-26) [2024-10-01]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10451142/content.html>. (BeiDou Network: China successfully launches the 57th and 58th BeiDou navigation satellites [EB/OL]. (2023-12-26) [2024-10-01]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10451142/content.html>.(in Chinese))
- [15] 于素君,易昌华,李春芬,等. 北斗卫星导航系统定位原理及其应用综述[J]. 物探装备, 2020, 30(1): 59-63. (YU Sujun, YI Changhua, LI Chunfen, et al. Overview of the positioning principles and applications of the BeiDou satellite navigation system[J]. Journal of Geophysical Exploration Equipment, 2020, 30(1): 59-63. (in Chinese))
- [16] 施闯,赵齐乐,李敏,等. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 854-861. (SHI Chuang, ZHAO Qile, LI Min, et al. Precise orbit determination and positioning research of the BeiDou satellite navigation

system[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(6): 854-861. (in Chinese))

- [17] 中华人民共和国水利部. 土石坝安全监测技术规范: SL 551—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical specification for earth-rockfill dam safety monitoring: SL 551-2012[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国水利部. 混凝土坝安全监测技术规范: SL 601—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical specification for concrete dam safety monitoring: SL 601-2013[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))

Considerations on the applicability of the BeiDou System in hydraulic engineering safety monitoring

LIU Yan¹, HOU Wenang^{2,3,4}, DU Zhenhan³, HUANG Jianfeng³

(1. Yellow River Guxian Water Conservancy Hub Co., Ltd., Zhengzhou 450018, China; 2. Dam Safety Management Center, Nanjing 210029, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The BeiDou System (BDS) is a Chinese-developed global satellite navigation system that offers advantages such as global coverage, short-message communication, and real-time positioning. In recent years, the BDS has seen some applications in hydraulic engineering safety monitoring. However, it has faced criticisms, including concerns over insufficient precision and unreliable calculation results. This paper reviews the technical characteristics of the BeiDou system, analyzing its applicability, advantages, and limitations within the context of hydraulic engineering safety monitoring. It highlights the potential of the BDS in areas such as emergency communication and surface deformation trend monitoring in hydraulic projects. By enhancing its computational capabilities and integrating multi-sensor data, the BeiDou system can play a crucial role in applications such as the "one map" system, reservoir capacity monitoring, and surface deformation detection in hydraulic engineering safety monitoring scenarios. The paper advocates for further theoretical research and practical application to enhance its role in the safety management of hydraulic infrastructure.

Key words: the BeiDou system; hydraulic engineering; reservoir; dike; safety monitoring; applicability analysis