DOI: 10.11779/CJGE202210022

基于管道测量机器人的高堆石坝内部沉降测量方法

股 煜^{1,2},李清泉^{1,2},余建伟¹,张德津^{1,3},程 翔¹,陈智鹏^{*1,3}

(1. 广东省城市空间信息工程重点实验室,广东 深圳 518060; 2. 深圳大学土木与交通工程学院,广东 深圳 518060;

3. 深圳大学建筑与城市规划学院,广东 深圳 518060)

摘 要:针对传统堆石坝内部沉降监测方法难以适应高堆石坝内部沉降监测的技术要求以及现有监测方法研究中存在的不足,提出了一种基于管道测量机器人的高堆石坝内部沉降测量方法。首先介绍了基于管道测量机器人的高堆石坝内部沉降测量原理以及监测系统组成和部署方法,然后通过模型试验验证了管道机器人高程测量精度,最后成功应用于两河口大坝。高程检核结果表明,管道测量机器人的高程测量精度达到了 0.32 mm。选取了一段起止时间与水管式沉降仪一致的监测管道沉降监测数据与之进行对比,其中起止时间的管道高程测量重复精度分别达到了 15×10°和 10×10°,对比结果表明,两套监测系统的监测结果沉降趋势基本一致,具有强相关性。工程应用情况表明,基于管道测量机器人的高堆石坝内部沉降测量方法可有效监测堆石坝内部沉降,是一种具有良好应用前景的新型变形监测技术。 关键词:堆石坝;内部变形;管线测量;惯性测量;管道测量机器人

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2022)10 - 1951 - 08 作者简介: 殷 煜(1993一), 男,博士研究生,主要从事多传感器集成与同步控制以及基础设施健康监测与安全运维 研究。E-mail: yinyu2019@email.szu.edu.cn。

Measuring method for internal settlement of high rockfill dams based on pipeline measuring robot

YIN Yu^{1, 2}, LI Qing-quan^{1, 2}, YU Jian-wei¹, ZHANG De-jin^{1, 3}, CHENG Xiang¹, CHEN Zhi-peng^{1, 3} (1. Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen 518060, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. School of Architecture & Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060,

China)

Abstract: Aiming at the difficulty of the traditional monitoring methods for internal settlement of rock-fill dams to meet the technical requirements for monitoring the internal settlement of high rock-fill dams and the deficiencies in the existing monitoring methods, a method is proposed for measuring the internal settlement of high rock-fill dams based on the pipeline measuring robot. Firstly, the principle for measuring the internal settlement of the high rockfill dams based on the pipeline measuring robot and the composition and deployment method of the monitoring system are introduced. Then, the accuracy of the elevation measurement of the pipeline robot is verified through the model tests, and finally, it is successfully applied to Lianghekou Dam. The elevation check results show that the accuracy of the elevation measurement using the pipeline measuring robot has reached 0.32 mm. A period of pipeline settlement monitoring data with the same starting and ending time as the hydraulic overflow settlement gauge is selected for comparison. Among them, the repeated accuracy of pipeline elevation measurement of the starting and ending time reaches 15 ppm and 10 ppm, respectively. The comparison shows that the monitoring results of the two monitoring systems are in agreement, and they are strongly correlated. Engineering applications show that the measuring method for the internal settlement of high rockfill dams based on the pipeline measuring robot can be effectively used to monitor the internal settlement of high rockfill dams based on the pipeline measuring robot can be effectively used to monitor the internal settlement of high rockfill dams based on the pipeline measuring robot can be effectively used to monitor the internal settlement of rockfill dams, and it is a new type of deformation monitoring technology with good application prospects.

Key words: rockfill dam; internal deformation; pipeline measurement; inertial measurement; pipeline measuring robot

0 引 **言** 堆石坝是一种以土石料为主体并在坝体上游面设

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41901412);国家重点研 发计划项目(2019YFB2102703;2020YFC15120001) 收稿日期:2021-08-27 *通信作者(E-mail:chenzp1990@szu.edu.cn)

置防渗体结构构建而成的坝型,具有投资少、工期短、 安全性高的优点。现已逐渐发展成为中国水利水电开 发的优选坝型。随着中国筑坝技术的快速发展,堆石 坝的建设成就显著,建成了一批 200 m级标志性工程, 积累了大量宝贵的工程经验,目前正在向 300 m级发 起攻关^[1-2]。作为经验坝型,堆石坝的相关监测资料是 十分重要的工程经验成果,对研究堆石坝的变形机理 以及评估其运行状态具有重要的参考价值。因此,堆 石坝的内部变形监测具有十分重要的意义。

但有关堆石坝安全监测的研究以及新型监测仪器 的发展及应用明显滞后于筑坝技术的发展,许多监测 仪器的适应性仍停留在100m级坝高水平^[3-4]。目前, 常用于堆石坝内部变形监测的引张线式水平位移计、 水管式沉降仪等,在200m级堆石坝的应用中,其监 测管路长度超过300m,这导致了引张线式水平位移 计的铟瓦钢丝支撑点数量以及铟瓦钢丝自重增加,水 管式沉降仪的液位平衡时间变长。实际使用过程中出 现了引张线式水平位移计因铟钢丝徐变和摩擦阻力造 成的误差不可忽略,水管式沉降仪出现读数突变等问 题^[3-4]。应用实践证明,传统堆石坝内部变形沉降监测 仪器的适应性受到坝高限制,难以满足300m级高堆 石坝的内部变形监测需求,亟需开展堆石坝内部变形 监测新方法的相关研究。

针对传统堆石坝内部变形监测方法存在的不足, 相关学者进行了一系列新型堆石坝内部变形监测方法 的探索。蔡德所等^[5]、廖铖等^[6]、何斌等^[7]、孙汝建等^[8] 提出了基于管道测量技术的大坝形变监测方法,其测 量原理都是在大坝内部埋设专用监测管道,然后利用 管道机测量器人对管道线形进行测量,最后推算出大 坝内部变形。蔡德所等^[5]、廖铖等^[6]采用不锈钢波纹管, 通过光纤陀螺推算倾角值,在根据卷扬机速度计算相 邻采样点之间的坐标增量,主要用于面板挠度测量, 已成功应用于思安江、水布垭等面板堆石坝。何斌等[7]、 孙汝建等[8]采用的是钢管,利用倾角计测量单节管道 倾角,利用里程计测量行走距离,通过单节管道长度 和倾角递推垂直沉降,通过探测水平位移测点位置推 算水平位移,目前暂无实际工程应用案例。以上方法 均采用四轮机器人测量管道底部线形,测量重复性还 有待提升,监测管道均选择了钢管,而单节钢管在轴 向上刚度较大,几乎不发生变形,难以真实的反映堆 石坝内部沉降。公开资料显示,国外暂无管道测量机 器人应用于堆石坝内部变形监测的相关报道。随着惯 性测量技术的发展,管道测量机器人在城市地下管线 探测领域[9-10]也有着广泛应用。一般采用绝对控制点辅 助惯导/里程计定位,定位精度为里程长度的0.1%左右。 对于百米以上的测量目标,测量精度仅为厘米级,难以 满足《土石坝安全监测技术规范》(SL 551—2012)^[11]的精度要求。因此基于管道机器人的堆石坝内部变形 监测方法在监测管道选型制造,管道测量机器人的结 构设计、传感器集成以及数据解算等方面还存在较大 的改进空间。

综合现有研究,结合堆石坝变形的一般规律及特点^[12],选择了柔性监测管道,并设计了柔性监测管道的布设方法。通过改进管道测量机器人的结构设计和 传感器集成方式,利用集成高精度激光惯导/多里程计 的管道测量机器人对预埋柔性管道进行多期精密测 量,通过多源数据最优融合定位算法推算管道高程曲 线,最后通过多期管道高程曲线关联配准比对,计算 大坝内部沉降值,并将相关研究成果成功应用于两河 口大坝内部沉降监测,为中国 300 m 级堆石坝内部沉 降监测提供了经验参考。

1 测量方法

1.1 管道测量机器人高堆石坝内部沉降测量原理

管道测量机器人堆石坝内部沉降测量方法是在大 坝填筑期,根据堆石坝变形的一般规律和特点,在关 键位置埋设柔性抗压变形监测管道,监测管道如同神 经纤维一样反映坝体内部形变,同时为管道测量机器 人提供观测通道。在变形监测过程中,通过集成高精 度激光惯导/多里程计的管道测量机器人对变形监测 管道进行精密测量,利用多源数据最优融合定位算法 估计管道测量机器人的运动轨迹,从而获得监测管道 的高精度三维曲线;进一步,利用不同时期的管道三 维曲线关联配准后进行比对,计算得出大坝的内部变 形参数指标。基于管道测量机器人的堆石坝内部沉降 测量原理如图1所示。



g. I Principle of internal settlement measurement of rockfil dam based on pipeline measuring robot

1.2 管道线形及沉降计算方法

管道测量数据处理以卡尔曼滤波为框架,管口坐标作为绝对控制点,对惯性测量数据递推解算进行约束。再利用 RTS 平滑算法处理得到管道测量机器人运动的最优轨迹,即管道三维线形。然后通过不同时期的管道高程曲线关联比对,计算得到对应时期的相对沉降值。管道测量机器人数据处理框架如图 2 所示。





Fig. 2 Framework of data processing of pipeline measuring robot

监测管道相对高程曲线通过管道测量机器人的姿态俯仰角和里程增量进行递推得到。监测管道高程递 推原理如图3所示。



Fig. 3 Recursion principle of pipeline elevation

图 3 中, h_n , d_n , θ_n 分别为第n个测点处的管 道高程、里程增量以及俯仰角, 俯仰角范围为 $-\pi/2 \sim \pi/2$, 水平向上为正。高程曲线推导如下:

$$h_n = h_0 + \sum_{i=1}^n d_i \sin \theta_i \quad \circ \tag{1}$$

假设每次作业重复测量*k*次,则平均高程曲线如下:

$$f_{\text{ave}}(d_n, h_n) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f_i(d_n, h_n)$$
, (2)

式中, *f_i(d_n,h_n)* 为单次测量高程, *f_{ave}(d_n,h_n)* 为平均高程。对于无真值参考的情况, 重复性是衡量精度的重要指标, 文中涉及的精度指标均以中误差以及相对误差来衡量, 高程测量中误差σ可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k} (f_i(d_n, h_n) - f_{ave}(d_n, h_n))^2}{k}} \quad . \quad (3)$$

将不同时期的监测管道平均高程曲线作差即得到 相应时期的相对沉降值。沉降值计算如下:

$$f_{\Delta}(d,h) = f_{\text{ave}}^{\text{mes}}(d,h) - f_{\text{ave}}^{\text{ref}}(d,h) \quad , \qquad (4)$$

式中, $f_{\Delta}(d,h)$ 为相对沉降值, $f_{ave}^{mes}(d,h)$ 为当前时期 平均高程曲线, $f_{ave}^{ref}(d,h)$ 为参考高程曲线。

1.3 管径测量原理

监测管道管径变化会影响管道中线测量结果。为 了确定监测管道在坝体中的运行状态,通过在下压杆 臂结构的里程轮关节处分别安装编码器,测量出里程 轮运行过程中随管壁的起伏角度,即可求得里程轮下 压的距离,即管径的连续变化值。监测管道管径测量 原理如图4所示。



Fig. 4 Principle of pipe diameter measurement

3 个里程轮的转轴在一个平面内呈 120°均匀对称分布,可通过 3 个里程杆臂中的任意两个的角度变化计算出管径的变化值,计算推导如下:

$$\Delta_{\rm d} = \frac{2L}{3} (\sin\theta_1 + \sin\theta_2 + \sin\theta_3) \quad , \qquad (5)$$

式中, Δ_1 为管径变化值,L为杆臂值, θ_1 , θ_2 , θ_2 分 别为里程轮杆臂的角度变化值,单位为 rad。

2 测量系统

基于管道测量机器人的堆石坝内部沉降测量系统 主要包括柔性监测管道和管道测量机器人。监测管道 随坝体变形而变形,同时为管道测量机器人提供观测 通道。利用管道测量机器人对监测管道重复测量,获 得管道高程曲线,通过多期管道高程曲线比对,获得 管道沉降,最后通过管道沉降来反演坝体沉降。

2.1 管道测量机器人

采用深圳大学自主研制的高精度管道测量机器 人^[13-15],主要包括载体车架和多传感器集成采集单 元。车架采用强制对中结构设计,保证了管道测量机 器人的中轴线与管道中轴线的一致性。多里程计冗余 设计能保证同一时刻至少有两个里程轮与管壁接触, 有效减小了由里程轮打滑造成的误差,同时,采用独 立下压杆臂结构的里程轮设计,并在杆臂关节处安装 编码器,用于测量里程轮杆臂下压角度。多传感器集 成采集单元由高精度多传感器同步控制器、多传感器 单元以及锂电池组成。多传感器单元包括高精度激光 惯导和多路里程计,多传感器同步控制器负责传感器 数据的同步采集与存储。管道测量机器人如图 5 所示。



图 5 管道测量机器人 Fig. 5 Pipeline measuring robot

2.2 柔性监测管道及布设

柔性监测管道采用管径 250 mm, 壁厚 23 mm, 一体挤压成型 HDPE 管,其轴向有良好的柔性,径向 具有很高的强度。弯曲和碾压试验表明,HDPE 管轴 向具有良好的柔性变形特性,可跟随坝体变形而变形, 且径向截面不易变形。为了方便运输,出厂时先进行 分段切割,运抵现场后,再通过电热熔管套将分段管 道进行电热熔接,最后连接成为一根连通的监测管道。 柔性监测管道如图 6 所示。



图 6 柔性监测管道

Fig. 6 Flexible monitoring pipeline

监测管道采用水平分层布置,即根据实际坝高分 多个监测横断面,间距 20~50 m。在每个监测横断面 同一部位布设监测管道。监测管道呈 U 形布设,坡度 1%,弧段部分高于两端管口,防止管道内部积水,两 端管口伸入观测房内,便于管理与测量。为了减少开 挖土方量,U 形监测管道直线段部分可与传统监测仪 器共用沟槽,同时也方便与传统监测仪器的监测结果 进行有效比对。对于横断面较长的高程面可布设多根 监测管道,以确保关键位置的沉降处于监测之中。对于 心墙堆石坝一般只需监测心墙下游,对于面板堆石坝 则需穿过坝轴线监测整个横断面。柔性监测管道布设 示意图如图 7 所示。







柔性监测管道埋设沟槽的开挖与回填工艺需严格把控,沟槽底部开挖宽度 1.5 m,开挖面坡度比 1: 1。回填料的回填顺序应遵循内细外粗的原则,最内侧 为细沙,包裹厚度至少大于 30 cm,往外依次为垫层 料、坝体填筑料,垫层料厚度也应大于 30 cm,以保 护监测管道不被挤压损坏,延长监测管道使用寿命。 柔性监测管道埋设工艺如图8所示。



Fig. 8 Buried process of flexible monitoring pipeline

3 模型试验

为了验证基于管道测量机器人的堆石坝内部沉降 测量方法的高程测量精度,在深大校园内搭建了一段 试验管道。选取了3个已知点,人为垫高,模拟垂直 变形,然后通过管道测量机器人分别测量垫高前后的 管道高程,最后通过徕卡激光跟踪仪 AT-960 进行高程 检核来验证管道测量机器人的高程测量精度。管道测 量机器人采用导航级激光惯导,陀螺零偏稳定性为 0.01°/*h*_r,经过验证,管道测量机器人的高程测量精 度达到了 0.32 mm。管道测量机器人高程测量及激光 跟踪仪高程检核如图 9 所示。





4 工程应用

4.1 工程背景

两河口大坝位于四川省甘孜州雅江县境内的雅 砻江干流上,为雅砻江中下游梯级电站的控制性水库 电站工程,对整个雅砻江梯级电站的开发影响巨大。 两河口大坝采用黏土心墙堆石坝,最大坝高达 295 m, 居世界同类坝型前列,无同类工程经验可借鉴。因此 两河口大坝的内部变形监测对研究 300 m 级超高堆石坝的变形机理具有重要的意义。

4.2 测量系统部署

根据堆石坝的内部变形的一般规律和特点,综合 两河口大坝的相关有限元仿真结果^[16-17],在 2775 m 高程布设了一根 371 m 长的 U 形监测管道,部分监测 沟槽与水管式沉降仪共用。U 形监测管道的直线段部 分分别与水管式沉降仪 2—2、3—3 监测断面重叠,两 河口大坝柔性监测管道布设如图 10 所示。



图 10 两河口大坝柔性监测管道布设 Fig. 10 Deployment of flexible monitoring pipeline for Lianghekou Dam

5 数据分析与验证

本节首先通过分析里程轮杆臂关节编码器数据, 验证了监测管道在严格按照埋设工艺进行施工的情况 下不会发生明显形变。然后通过计算监测管道高程测 量的重复性误差,验证了管道测量机器人的测量精度; 最后将管道测量机器人监测数据分成 2—2、3—3 两个 监测纵断面分别与水管式沉降仪监测数据进行对比, 验证了管道测量机器人的可行性。

由于管道测量机器人首次测量时间为 2020 年 5 月4日,而水管式沉降仪的首次观测时间为 2020 年 8 月15日,二者的基准时间存在不一致,且水管式沉降 仪各观测桩的埋设时间也存在不一致。因此为了方便 两套沉降监测系统进行有效比对,需选取二者测量时 间重叠的时间窗口。

5.1 管径变化

监测管道埋入坝体内部后由于坝体填筑料的挤压 会发生一定程度的形变,微小形变不会影响监测管道 功能,但会根据数值的大小对管道线形的解算产生不 同程度的影响。通过对里程轮杆臂关键编码器数据进 行分析发现,截至 2020 年 11 月 13 日,监测管道埋设 半年后,并未发生明显变形,管径变化在 0.1 mm 以 内,截至 2021 年 5 月 31 日,即监测管道埋设 1 a 后, 相较于 2020 年 11 月,几乎未发生变形。可见在严格 执行监测管道回填工艺要求的情况下,监测管道在运 行过程中,几乎不会生明显变形。监测管道管径变化 如图 11 所示。



Fig. 11 Change of diameter of monitoring pipeline

5.2 观测房沉降

大坝沉降过程中,观测房作为坝体表面建筑,会随大坝一同沉降。监测管道两端管口延伸至观测房内并与之固联,随观测房一同沉降,观测房沉降即管口沉降。观测房的沉降值通过连续测量观测墩的位置坐标获得。以2020年5月7日测量值为基准,#11、#12观测房从2020年5月7日至11月12日的累计沉降分别达到了518.3和636.5mm。至2021年5月31日的累计沉降分别达到了645.0和788.7mm。观测房高程观测值及沉降如表1所示。

表 1 观测房高程测量值及沉降

Table. 1 Elevations and settlements of observiong room

观测日期	#11 观测房		#12 观测房	
	高程/m	沉降/mm	高程/m	沉降/mm
2020-05-07	2775.3606	0	2775.3776	0
2020-11-12	2774.8423	518.3	2774.7411	518.3
2021-05-31	2774.7156	645.0	2774.5889	788.7

5.3 监测管道沉降

监测管道沉降是以基准值为参考,通过不同时期 的管道高程曲线与参考高程曲线作差,再通过观测房 的沉降进行修正后得到。分别选取了2020年11月13



Fig. 12 Measured results of pipeline elevation

日和 2021 年 5 月 31 日的测量数据,然后将这两期测量的沉降值作差即得到此期间的相对沉降。其中 2020 年月 13 日多次测量数据中误差为 5.60 mm,重复精度 15×10⁻⁶。2021 年 5 月 31 日多次测量数据的中误差 3.58 mm,重复精度 10×10⁻⁶。满足堆石坝变形监测规 范^[11]的精度要求。管道高程测量结果如图 12 所示。

根据心墙堆石坝沉降的一般规律,在垂直于大坝 轴线方向上,越靠近心墙,沉降速度越快^[14]。监测管 道沿垂直于坝轴线方向呈"U"形排布,因此沉降曲 线会呈现"M"形。取垂直下沉为正,两河口大坝 2020年5月至11月以及2020年5月至2021年5月 的内部沉降情况如图13所示。



图 13 两河口大坝内部沉降情况

Fig. 13 Internal settlements of Lianghekou Dam

5.4 沉降数据对比分析

由于两套监测系统的基准值存在偏差,为了进行 有效对比,选取了 2020 年 11 月 12 日至 2021 年 5 月 31 日期间的监测数据进行对比,有效保证了监测时间 窗口的一致性,分别计算了二者在此期间的相对沉降 值以及二者沉降值之间的偏差值。管道测量机器人与 水管式沉降仪相对沉降数据对比如表2所示。

表 2 管道测量机器人与水管式沉降仪相对沉降数据对比

Table 2 Comparison of relative settlements between pipeline

measuring robot and hydraulic overflow settlement gauge

	•	•		0 0
水管式沉	管道测量	水管式沉	管道测量机	二者沉降
降仪	机器人对	降仪沉降	器人沉降值	值偏差值
观测桩号	应里程/m	值/mm	/mm	/mm
H87	56	229.7	240.9	11.2
H47	96	292.6	312.9	20.3
H46	133	341.2	361.4	20.2
H45	148	379.4	390.2	10.8
H16	208	414.7	469.2	54.5
H17	223	363.5	437.2	73.7
H18	263	302.5	343.7	41.5
H83	303	225.5	278.8	53.3
	水管式沉 降仪 观测桩号 H87 H47 H46 H45 H16 H16 H17 H18 H83	水管式沉 管道测量 降仪 机器人对 观测桩号 应里程/m H87 56 H47 96 H46 133 H45 148 H16 208 H17 223 H18 263 H83 303	水管式沉管道测量水管式沉降仪机器人对降仪沉降观测桩号应里程/m值/mmH8756229.7H4796292.6H46133341.2H45148379.4H16208414.7H17223363.5H18263302.5H83303225.5	水管式沉管道测量水管式沉管道测量机降仪机器人对降仪沉降器人沉降值观测桩号应里程/m值/mm/mmH8756229.7240.9H4796292.6312.9H46133341.2361.4H45148379.4390.2H16208414.7469.2H17223363.5437.2H18263302.5343.7H83303225.5278.8

水管式沉降仪与管道测量机器人存在测量模式的 区别,水管式沉降仪采用点式测量,管道机器人为分 布式测量。为了将二者数据进行对比分析,首先提取 了管道测量机器人与水管式沉降仪测点对应里程点的 数据,然后拟合沉降趋势进行对比。采用三次样条拟 合,计算得出 3—3 断面和 2—2 断面的水管式沉降仪 与管道测量机器人沉降趋势曲线拟合参数之间的相关 系数分别为 0.9954 和 0.9821,表明二者的沉降趋势具 有强相关性。趋势对比分 2—2、3—3 两个监测断面分 别进行,管道测量机器人与水管式沉降仪沉降趋势对 比如图 14 所示。



图 14 管道测量机器人与水管式沉降仪沉降趋势对比 Fig. 14 Comparison of settlement trends between pipeline

measuring robot and hydraulic overflow settlement gauge

数据分析表明,管道测量机器人与水管式沉降仪 数据在沉降趋势上具有强相关性,管道测量机器人的 监测数据会比水管式沉降仪整体偏大几十毫米,且 2—2 断面和 3—3 断面的二者数值偏差也存在不同。 这是由于两河口大坝监测横断面较大,铺设水管式沉 降仪监测管路较长,导致液位平衡时间大大加长,监 测数据存在一定延迟,甚至出现读数跳变的问题。因 此水管式沉降仪的监测数据会相对偏小。2—2 断面与 3—3 断面二者的监测数据偏差不是严格对称的原因 主要是由于两个纵断面并不是严格沿垂直坝轴线方向 对称的,2—2 断面更接近最大坝高所在纵断面,因此 沉降速度相较于 3—3 断面会更快,所以二者差值会更 明显。同时,从监测结果来看,相较于稀疏的测量点 位拟合,管道测量机器人获取的连续沉降数据更精细, 更能反映大坝内部变形的真实情况。

6 结 论

提出了基于管道测量机器人的堆石坝内部沉降测 量方法,并成功应用于两河口大坝的内部沉降监测, 得到以下4点结论。 (1)基于管道测量的堆石坝内部变形监测方法相较于传统监测方法,不受坝高等因素影响,只需在坝体内部埋设监测管道,一台管道测量机器人即可完成多个高程、多个断面的监测任务。同时管道测量机器人与监测管道相互独立,方便升级维护,成本更低,具有良好应用前景。

(2)基于管道测量的堆石坝变形监测方法为分布 式测量,相较于传统点式测量方式,数据更加精细, 更能真实的反应堆石坝内部变形情况。

(3)管道测量机器人强制对中结构设计,能很好的保证车体中轴线与管道中线重合。相较于四轮机器人,同等条件下,在管道线形测量上具有更好的重复精度。

(4)选用柔性监测管道相比于钢管等刚性管道更 能真实地反映堆石坝的内部变形,且通过加厚管壁和 严格的回填工艺,柔性监测管道在坝体内部不会发生 明显的截面变形,可适应长期的监测需求。

参考文献:

- MA H Q, CHI F D. Major technologies for safe construction of high earth-rockfill dams[J]. Engineering, 2016, 2(4): 498 - 509.
- [2] 钮新强. 高面板堆石坝安全与思考[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1): 104 - 111. (NIU Xin-qiang. Security of high concrete face rockfill dam consideration and conclusion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1): 104 - 111. (in Chinese))
- [3] 邹 青. 中国高面板堆石坝安全监测关键技术进展与展望
 [J]. 大坝与安全, 2016(1): 50 56. (ZOU Qing. Progress and prospect of key technologies in safety monitoring of high face slab rockfill dams in China[J]. Dam & Safety, 2016(1): 50 56. (in Chinese))
- [4] 张礼兵, 邹 青. 300 m 级高面板堆石坝安全监测新技术展 望[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(6): 41 - 45. (ZHANG Li-bing, ZOU Qing. Prospect of new technology for safety monitoring of 300m high face rockfill dam[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(6): 41 - 45. (in Chinese))
- [5] 蔡德所,李昌彩,卫炎,等. 三维光纤陀螺系统分布式测量思安江面板堆石坝挠度[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4):
 79-82. (CAI De-suo, LI Chang-cai, WEI Yan, et al. Three dimensional fiber optic gyro for distributed deflection measurement in Si-Anjiang concrete faced rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(4): 79-82. (in Chinese))
- [6] 廖 铖, 蔡德所, 李 苗, 等. 基于光纤陀螺的水布垭水电

站大坝面板挠度变形规律分析[J]. 水利水电技术, 2015, 46(11): 97 - 100. (LIAO Cheng, CAI De-suo, LI Miao, et al. Fiber-optic gyroscope based-analysis on law of deflection deformation of face slab of dam for Shuibuya Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(11): 97 - 100. (in Chinese))

- [7] 何 斌, 孙汝建, 何 宁, 等. 基于管道机器人技术的高面 板堆石坝内部变形测量方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 78 82. (HE Bin, SUN Ru-jian, HE Ning, et al. The measuring method of the inner deformation for high concrete faced rockfill dams with pipe-robot monitoring system[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(5): 78 82. (in Chinese))
- [8] 孙汝建,何 宁,王国利,等.大坝内部变形的机器人监测 方法和监测系统: CN103196416A[P]. 20130710. (SUN Ru-jian, HE Ning, WANG Guo-li, et al. Robot Monitoring Method and Robot Monitoring System of Deformation Inside Dam: CN103196416A[P]. 20130710. (in Chinese))
- [9] CHEN Q J, ZHANG Q, NIU X J, et al. Positioning accuracy of a pipeline surveying system based on MEMS IMU and odometer: case study[J]. IEEE Access, 2019, 7: 104453 - 104461.
- [10] WANG X H, SONG H. The inertial technology based
 3-dimensional information measurement system for underground pipeline[J]. Measurement, 2012, 45(3): 604 - 614.
- [11] 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. (Technical Specification for Earth-Rockfill Dam Safety Monitoring: SL 551-2012[S]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))
- [12] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009,
 31(1): 1 14. (YIN Zong-ze. Stress and deformation of high

earth and rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(1): 1 - 14. (in Chinese))

- [13] 李清泉,陈智鹏,殷 煜,等. 一种管道三维曲线测量机器人及其实现方法: CN109780370B[P]. 2020-05-26. (LI Qing-quan, CHEN Zhi-peing, YIN Yu, et al. Pipeline Three-Dimensional Curve Measuring Robot and Implementation Method Thereof: CN109780370B[P]. 2020-05-26. (in Chinese))
- [14] 殷 煜,陈智鹏,李清泉,等.高精度管线测量机器人多 传感器集成方法[J].电子测量技术,2019,42(2):23-27.
 (YIN Yu, CHEN Zhi-peng, LI Qing-quan, et al. Multi sensor integration method for high precision pipeline survey robot[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(2):23-27. (in Chinese))
- [15] 殷 煜. 高精度管道测量机器人多传感器集成系统设计 与实现[D]. 武汉: 华中师范大学, 2019. (YIN Yu. Design and Implementation of Multi-Sensor Integrated System for High Precision Pipeline Measurement Robot[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2019. (in Chinese))
- [16] 丁艳辉, 袁会娜, 张丙印, 等. 超高心墙堆石坝应力变形 特点分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 153 158.
 (DING Yan-hui, YUAN Hui-na, ZHANG Bing-yin, et al. Stress-deformation characteristics of super-high central core rock-fill dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 153 158. (in Chinese))
- [17] 陈志波,朱俊高.两河口心墙堆石坝应力变形及参数敏感 性三维有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 893 - 899. (CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao. Threedimensional finite element analysis on stress-strain and materials parameters sensibility of Lianghekou core rockfill dam[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 893 - 899. (in Chinese))