

文章编号:1672-3031(2017)01-0054-07

## 水利工程建设质量监控中的超宽带技术研究与应用

江新兰<sup>1</sup>, 陈煜<sup>1</sup>, 缪纶<sup>1</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 罗兆坤<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 信息中心, 北京 100038;

2. 北京普天通达科技有限公司, 北京 102218)

**摘要:** 现有的水利工程施工质量监控成果主要侧重于在运料、拌合等环节的控制, 而对施工质量影响最重要的坝面碾压环节在质量控制时进行了大量的简化处理, 一定程度上给工程的安全带来隐患。超宽带技术具有成本低、实时性强、自组网通信和超宽带频的特点, 特别适用于实时性要求较高的水利工程建设中的坝面碾压质量监控。本文首先从实时性、安全性和经济性三个方面, 对超宽带技术在水利工程建设质量监控中的适用性进行了分析, 然后介绍了超宽带技术原理及其基站建设原则。最后, 以山西守口堡胶凝砂砾石坝建设施工质量监控为例, 阐述了在大坝填筑施工现场搭建的超宽带基站及组网布设情况, 采用超宽带技术实现对动态作业区碾压车的实时动态跟踪监控, 获取坝面碾压过程中碾压遍数、碾压轨迹、碾压方式等关键施工工况信息, 为工程质量管理者提供准确判断依据, 从而达到施工质量控制的基本目标。

**关键词:** 超宽带技术; 水利工程; 施工质量; 胶凝砂砾石坝

**中图分类号:** TP929.53

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.01.008

### 1 研究背景

水利工程施工不仅包含复杂的机械设备、种类繁多的物资、众多的人力资源, 而且还容易受外界气候、水文气象、水文地质、地形地貌、甚至外部经济社会环境等因素的影响。若在建设过程中措施不当或控制不严, 容易产生质量问题和缺陷, 给工程安全带来一定程度上的隐患<sup>[1]</sup>。因此, 如何有效地进行实时监控是保证水利工程建设质量的重中之重。然而, 传统水利工程建设质量监控多采用人工观测的方式, 这种方式存在工作量大、选点随意性大、准确度低、施工干扰大等不足, 很难在当前施工实际情况的基础上预测未来施工进度和质量, 发现质量问题后难以及时进行处理, 导致质量控制缺乏实时性<sup>[2]</sup>。

水利工程施工的复杂性决定了质量管理的难度之大, 需要充分考虑运料、储料、拌合、入仓、平仓、碾压等各个工序的组织协调以及内外约束的动态性, 做好整个施工工艺流程的组织和相互协作, 在保证施工质量的前提下降低成本、优化工期<sup>[3]</sup>。然而, 现有的水利工程施工质量监控成果主要侧重于在运料、拌合等环节的控制, 而对施工质量影响最重要的坝面碾压环节在质量控制时进行了大量的简化处理, 这种经验性的、不精确的简单记录方式, 一定程度上也给工程的安全带来隐患。实际上, 碾压施工时振动碾的行走速度直接影响碾压效率及压实质量, 行走速度过快压实效果差, 振动碾过慢容易陷碾, 并降低施工强度。同时在实际施工中, 各条带之间由于平仓所带来的骨料分离等现象需要人工加以处理, 卸料后应及时平仓<sup>[4]</sup>、碾压, 导致实际情况往往是碾压远远滞后于平仓。此外, 在施工过程的可视化表达与基于施工进度偏差的实时纠正等方面, 需要进行更加深入的研究<sup>[5]</sup>。

面向工程建设全过程的实时动态监控是水利工程质量监控发展的必然趋势。为了填补当前对坝面碾压环节质量监控的简化处理, 更好地对实际筑坝的碾压施工过程进行全天候、高精度、高效益

收稿日期: 2016-01-14

作者简介: 江新兰(1983-), 女, 江西万年人, 博士, 工程师, 主要从事软件开发、计算机应用技术和水利信息化技术研究。

E-mail: jxl@iwhr.com

的质量监控,对施工作业区的碾压车找到一种满足施工设计精度、稳定性、经济性、受环境影响小等特点的动态定位技术是必不可少的。超宽带技术(Ultra Wideband, UWB)自被 FFC(国际联邦通信委员会)允许通过以来一直备受关注,现已成为无线通信领域的一个研究热点,并被视为下一代无线通信的关键技术之一。UWB从美国引进国内时间很短,其有成本低、实时性强、安全性高和节能环保等优点,特别适用于中小型水坝等建设施工质量监控系统。因此,研究如何利用该新技术对水利工程建设质量进行实时监控具有一定的理论和实际意义。

## 2 超宽带技术在水利工程质量监控中的适用性

传统 GPS 技术是利用围绕地球的 24 颗卫星发射信号进行经纬度和高度的定位。GPS 利用 4 颗卫星即可对物体进行经纬度和高度  $X, Y, Z$  的三维定位,其中 3 颗进行坐标定位,1 颗卫星进行时钟矫正。GPS 除了具备测量经纬度和高度的作用以外, GPS 还具有其他一些功能,比如利用上一次定位的坐标和这次定位的坐标差进行测速,利用两次坐标差进行方向的定位,利用行进轨迹进行里程的计算和面积的计算等等。然而, GPS 是需要和卫星进行联系才能够定位的,城市里的水泥混凝土、高架桥、天线、电线,以及野外的山、树木等都是干扰信号,时常会有信号接受不到的情况发生,从而影响定位精度。而且,在动态定位的短时间观测内,卫星位置相对于接收机变化非常小,需要进行一定的技术处理才能保证一定的精度,难以实现快速准确定位。GPS 卫星同时发射两种码,一种为细码(P 码)和一种粗码(C/A 码)。P 码的精度非常高,通常可以控制在误差 3 m 以内,但只为军方服务。而民用的为 C/A 码,精度在 14 m 以内。由上述可知,传统 GPS 技术无法很好地满足高精度动态跟踪定位的实际应用。

UWB 是一种不用载波而采用时间间隔极短(小于 1ns)的脉冲进行通信的方式,利用纳秒至微微秒级的非正弦波窄脉冲传输数据,通过在较宽的频谱上传送极低功率的信号。它能在 10 m 左右的范围内实现数百 Mbit/s 至数 Gbit/s 的数据传输速率。终端设备测距和通讯模块提供点对点的、精度为厘米级的测距,抗干扰性能强,传输速率高,系统容量大,发送功率非常小,通信设备可以用小于 1mW 的发射功率就能实现通信,低发射功率大大延长系统电源工作时间,而且其电磁波辐射对人体的影响也会很小,符合绿色节能环保原则,应用面很广。

**2.1 施工碾压过程监控的实时性要求** 为了满足水利工程建设质量和工期要求,在快速施工和施工质量之间取得最佳平衡,同时施工过程中的气温、日照、风速、装卸机械运力等都会对筑坝材料有一定影响,所以必须根据水利工程所处的位置、气温因素、原材料等实际情况,对筑坝材料实行动态控制。从实际碾压施工工艺质量控制角度考虑,对施工作业区的碾压遍数、碾压厚度、碾压轨迹及是否振动碾压等关键的施工工况进行实时监控。从实际工程使用情况看,UWB 的三维定位技术具有较高的精度和稳定性,能够满足这一实时要求。

**2.2 施工质量监控数据的安全性要求** 由于水利工程中的一些地形地貌等数据属于敏感数据,不宜在公网上进行传输,而且建设单位也往往希望对工程质量监控数据具有一定的保密安全要求。因此,从水利工程施工质量监控的数据安全性角度考虑,由于 UWB 具有自组网通信和超宽带频的特性,具有较高的安全性和空间分辨率,特别适用于此类具有保密及安全要求的水利工程建设质量监控。

**2.3 工程施工质量监控的经济性要求** 若想要对坝面碾压环节进行更为细致的质量控制,则首先要对碾压车进行动态定位监测,其目的是通过对碾压车的跟踪定位来监测碾压车工况和绘制相关运动轨迹。传统 GPS 技术在水利工程数字化填筑监控方面也取得了一定的成果,在水布垭、瀑布沟水电站、糯扎渡水电站成功应用<sup>[6-8]</sup>。GPS 全球定位系统的基本原理是测量出已知位置的卫星到接收机之间的距离,然后综合多颗卫星的数据就可知道接收机的具体位置,若要精确定位接收机所处位置,至少要能接收到 4 个卫星信号。然而,实际上,大量水利工程都选址在峡谷地区建设,由于地形地貌的复杂性和特殊性,信号稳定性无法保证,需要增加架设基站增强信号接收的精度。超宽带技术作为一种新型的无线通信技术,通过时间冲击脉冲进行直接调制,可实现数据发射端与接收端以自组

网的方式进行通信，不受特殊地域限制，无需借助第三方设备，使用成本低，适用范围广。因此，从工程施工质量监控成本和适应范围角度考虑，超宽带设备具有一定的优势。

### 3 超宽带技术原理及基站建设原则

**3.1 技术原理** 在三维空间中，球形定位是通过多个参照节点( $N \geq 4$ )的坐标对目标节点进行测距的定位方法。一般地，选取4个及以上参考节点则可唯一确定目标节点位置。然而，在实际应用过程中，限于施工条件和经济等因素的考虑，往往选取3个参考点采用球形定位算法进行计算，由此可计算得出2个位置坐标，这时则需要根据坐标系设计过程中对坐标值的正、负值进行限定后，方可得到目标节点的坐标。

坐标系的建立可分为中心节点定位和相对定位两种方式。中心节点定位是指依据已知的中心节点计算一系列目标节点的位置坐标。在这个系统中，任意节点都可以充当中心参考节点，需保证各节点之间有可靠的端到端连接，进而得到中心节点与各个目标节点之间的距离和角度信息，并测算出其他节点的位置，但是每个中心节点对同一点进行定位时所依据的协调参考系却往往是不同的。相对定位则是指通过某一个共同的协调参考系来测算目标节点的位置(如GPS中的24颗地球同步卫星就可以组成一个共同的参考系)，这种拥有共同参考系的定位方式，可以使得在整个参考系中节点形成某一网络，同时依据一定的协议机制彼此可以交换各自的信息。参考系在最初的时候可以任意选择节点来组成，在很多情况下也可以由中心节点的参考系转化得到，参考系的选择可由相应的定位协议来完成。相对定位与中心节点定位的最大不同就是它拥有一个共同固定的参考系，而后者则依据不同的中心点就有不同的参考系。虽然相对坐标系不能直观对照现实环境确定移动点的位置，需要通过移动、旋转或换算坐标系值才能计算出移动点的位置，但是它具有以下优点：一、直接通过3个固定点建立空间三维坐标系，并且误差范围能够保持在测量仪器的测量范围的10 cm以内；二、计算过程没有复数的结果，可以比较准确的得到移动点的相对坐标值。

因此，超宽带基站选取3个固定节点采用相对坐标系进行设计，组成一个自组网的共同参考系。如图1所示，建立超宽带基站坐标系，由1个移动基站100和作为参考节点的3个固定基站101、102、103组成，组成了一个以100, 101, 102, 103为顶点的四面体，其中A, B, C, D, E, F表示其6条线段，考虑到D, E, F这3个线段理论上是固定值，因此由D, E, F的3边组成的三角形为XOY平面，并且以101点为坐标原点，以垂直于XOY平面的线为Z轴，以101到102方向为X轴正方向。

其中，坐标如下：101(0, 0, 0)；102(F, 0, 0)；103((D<sup>2</sup>+F<sup>2</sup>-E<sup>2</sup>)/2F, ( $\sqrt{D^2 - X_{103}^2}$ ), 0)；100(X, Y, Z)。在此坐标系中，101的坐标是(0, 0, 0)，102的坐标是(F, 0, 0)，103的坐标为(X<sub>103</sub>, Y<sub>103</sub>, 0)，根据DEF计算X<sub>103</sub>和Y<sub>103</sub>的坐标值，需要求解如下的二元二次方程组：

$$\begin{cases} \sqrt{X_{103}^2 + Y_{103}^2} = D \\ \sqrt{(X_{103} - X_{102})^2 + Y_{103}^2} = E \end{cases} \quad (1)$$

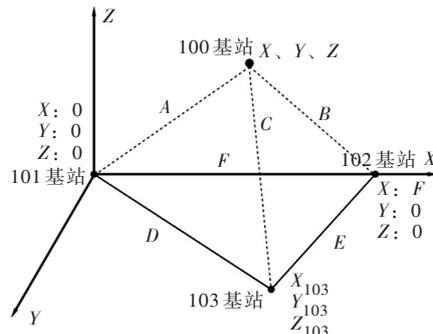


图1 超宽带基站坐标系

根据上面计算公式,依次计算出点 101, 102, 103 在整个坐标系中的坐标后,根据移动基站 100 到 3 个固定坐标之间的距离,在三维空间中根据  $ABC$  的值计算移动基站 100 点的  $X_{100}$ 、 $Y_{100}$ 、 $Z_{100}$  的坐标值,需要求解如下的三元二次方程组:

$$\begin{cases} \sqrt{X_{100}^2 + Y_{100}^2 + Z_{100}^2} = A_i \\ \sqrt{(X_{100} - X_{102})^2 + Y_{100}^2 + Z_{100}^2} = B_i \\ \sqrt{(X_{100} - X_{103})^2 + (Y_{100} - Y_{103})^2 + Z_{100}^2} = C_i \end{cases} \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

对计算的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  进行取正值处理,不同的 100 点坐标就是移动基站 100 的变化轨迹,从而则可根据此实现对移动基站 100 的实时动态跟踪定位,由此可计算出其行驶速度、行驶轨迹等信息。

**3.2 基站建设原则** 根据上述对定位原理和坐标系的分析,为保证定位算法能够达到测量的精度范围,并且能够直观地了解监测点的位置,必须对以上两种方法进行综合考虑,确保计算前进行多种方法验证,并且在建立基站前进行详细勘察和设计,具体原则如下:①建立 3 个固定点基站尽可能的保持在同一海拔,保证建立坐标系的固定平面和海平面平行,且测量仪器误差选定在厘米级别,避免增大误差;②建立 3 个固定点基站连接组成三角形尽可能的保持锐角三角形,提高算法中球体交集的取值精度;③3 个固定基站之间的距离保持固定值,使用自带的测距软件进行阶段性有效数据的平均值结合实际测量值进行综合考虑,避免由于信号不稳定增大误差;④建立基站的同时,在测量环境中建立一个不易被毁坏的基准测量点,阶段性的进行基准测量,用来阶段性的对系统进行校准,保证整体系统的稳定工作;⑤建立对异常数据的剔除规则,保证计算过程中数据浮动在要求的期望精度范围之内。

## 4 守口堡胶凝砂砾石坝建设施工质量监测实例

守口堡水库位于山西省大同市阳高县境内海河流域黑水河上游段,属小型水库,主坝采用胶凝砂砾石坝型,最大坝高 61.6 m,坝顶长 354 m,总库容为 980 万  $m^3$ 。

由于胶凝砂砾石坝在坝基、施工工艺和筑坝材料方面要求较低,导致其适用范围广,非常受一些峡谷地区等特殊地理环境的中小型水库及围堰等中小型水利工程青睐。与常规坝型相比,胶凝砂砾石坝在适用性和经济性方面具有独特的优势,可以就地、就近取材,无需设置集料筛分,施工进度快,施工工序简单高效,因而要求施工过程紧凑,高峰期筑坝效率要求高,实际坝面碾压工期很短,这给施工质量控制带来了一定的困难和风险,需要综合考虑影响施工质量的各方面因素,尽量采用自动化监控手段,加强施工过程中的实时质量监控力度。本文以山西守口堡胶凝砂砾石坝为例,采用超宽带技术对大坝填筑施工现场动态作业区振动碾压车进行实时监控,提供大坝铺筑层表面的实时碾压信息。

### 4.1 超宽带基站及布网设置

**4.1.1 基站设置** 根据守口堡大坝的实际勘测情况,施工现场架设的超宽带高精度定位网络由 4 个基站组成,选取了 3 个根据实际勘测选取的固定基站作为参考节点和 1 个移动基站安装在碾压车上实现跟踪动态定位,定位数据可以通过任何 1 个基站设备传回监测中心。上述 4 个基站模块选用 PulsON<sup>®</sup> 410 测距与通信模块,测距软件选用产品厂家提供的 RangeNet RET。该模块是一个微型的超宽带模块,采用独特的超宽带脉冲射频信号机制进行双向飞行时间测距和通信,即使在高度多径和高度反射的环境下,点对点测距精度也可控制在 2 cm 之内,满足碾压车三维高精度跟踪定位的实际需求。

**4.1.2 布网设置** 根据上述守口堡大坝的基站设置情况,将 4 个基站的位置布设示意图如图 2 所示。其中,根据上述分析的基站建立原则,基站 1、基站 2 和基站 3 在现场选点和布设时,采用了以下 3 个原则:(1)这 3 个基站构成的三角形保持锐角三角形,并且尽可能的使大坝包含在这个三角形内,

方可对行驶在大坝上任意位置的碾压车进行动态跟踪定位，实现其状态监测；(2)3个基站在同一个水平面上，保证建立相对坐标系的固定平面和海平面平行，避免增大误差；(3)建立基站的同时在测量环境中建立一个不易被毁坏的基准测量点，阶段性的进行基准测量，用来阶段性的对系统进行校准，保证整体系统的稳定工作。

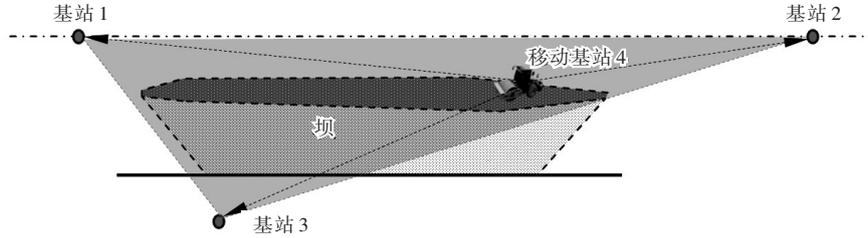


图2 基站位置布置

**4.2 碾压车监测类型逻辑关系分析** 胶凝砂砾石坝的施工工艺控制中，通过对碾压车的定位，监控碾压车行驶轨迹、工作状态，如碾压遍数、碾压速度、碾压轨迹、仓面厚度、仓面面积、压实度、起止和推铺时间等，是控制填筑作业质量的关键。将有关监控内容的逻辑关系进行分析，如图3所示。

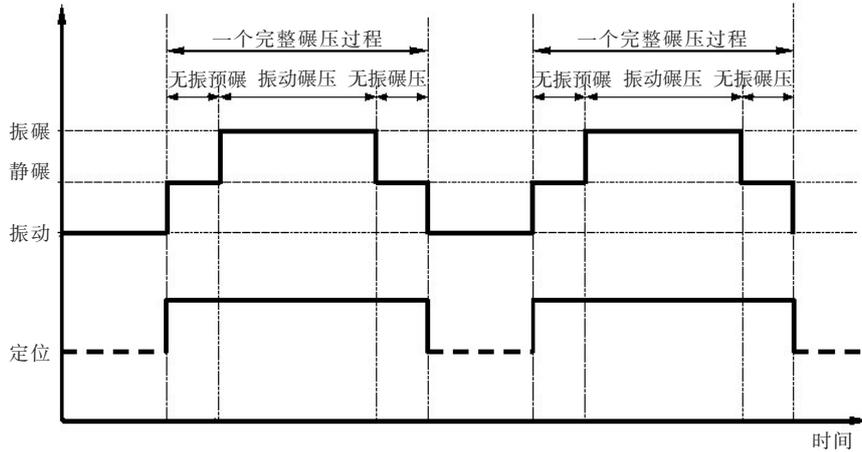


图3 碾压车监测类型逻辑关系

**4.3 碾压轨迹和碾压遍数实时绘制** 通过对碾压车的定位，监控系统每间隔 200 ms 提供一次位置计算结果，可以有效监控铺料厚度变化，各碾压机械的监控系统显示屏上可以反映出其自身的碾压状况(行驶轨迹、行走速度、碾压遍数)，而且在监控中心也可以对各移动端监控系统的碾压状况进行实时监视，如图4所示。

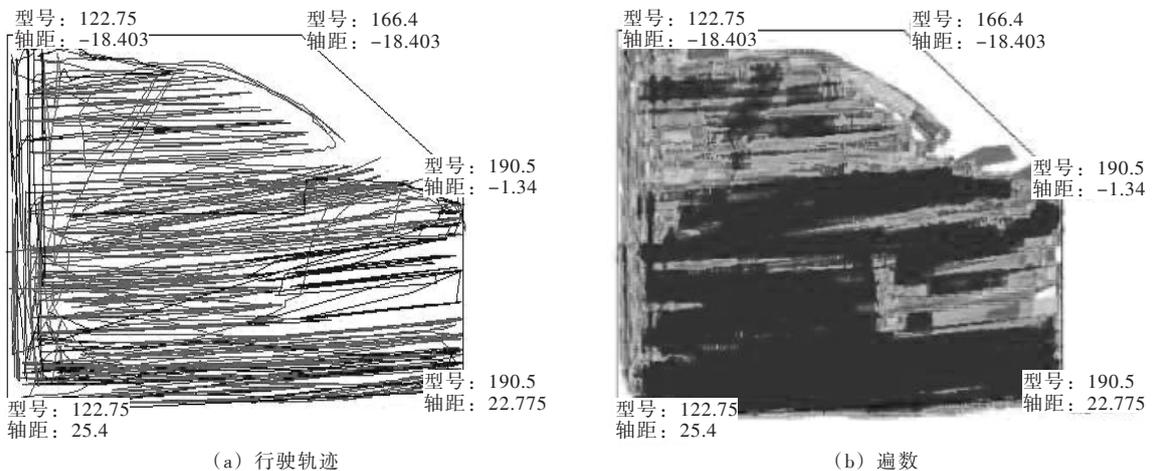


图4 碾压行驶轨迹和碾压遍数

**4.4 振动碾压状态动态识别** 碾压车振动监控是为了管理和监测碾压车的工作状况，根据施工工艺要求，碾压次数、碾压的方法都有严格要求，由于碾压车在不同工作状况下振动不同，设计通过振动监测仪来监控碾压车的工作状况。结合大坝施工工艺要求，碾压车在静碾工作状态下的移动速度约为4 km/h(约1.1 m/s)，在振动碾压工作状态下的移动速度为1~1.5 km/h(约0.28~0.42 m/s)。通过对振动测量数据的论证分析，得到不同振动状态下的波形，如图5所示。

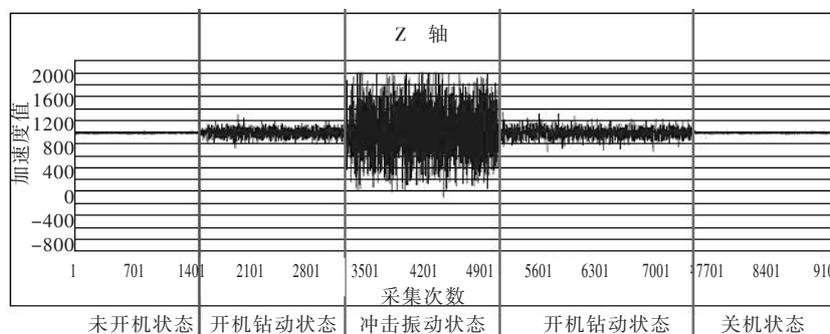


图5 不同振动状态下的波形

**4.5 施工质量监测效果分析** 判别超宽带技术实时监控对施工质量监控效果，既要对其对大坝施工作业质量目标的监控精度和采样密度能否满足要求，同时也要看其监控实时性。(1)超宽带实时监控很重要的一点在于移动基站设备与振动碾压车绑定，能够准确直观反映振动碾压车的行动轨迹、行动速度、碾压遍数，并对异常情况采取报警措施。特别是在大仓面填筑施工作业监控中，对于这3个重要碾压参数的监控密度可达到100%，一定程度上消除了质量控制的盲区。对于规范现场施工作业和强化振动碾压车驾驶员及相关施工人员质量责任意识，可起到重要作用。(2)超宽带实时监控借助人机可视化技术，从施工质量管理角度，拓宽了管理者的视角，建立了质量控制与施工调度间相关联的运行监控平台，能够更加直观掌控大体积堆石体填筑整体碾压施工质量状况，全面提高了质量管理效率和管理水平。(3)超宽带实时监控具有实时性，能够实时反映铺料厚度基本变化情况。(4)超宽带实时监控中检测者与管理者可为同一人，提高了施工过程效率。由于常规压实度检测试验时，需人工现场操作，且管理者与检测者通常不是同一个人，相对而言多了个环节，由此增加了一定的工作量。在高强度的大体积填筑碾压施工中，效率就显得更为突出。(5)超宽带实时监控虽可测定铺料碾压前后厚度基本变化，但精度并不足以直观反映最重要参数值——堆石体压实率，超宽带采样解算的高程数值和堆石体的压实度值之间尚不能快速地建立高精度的推定关系曲线。因而，超宽带技术本身只能作为监控压实率的辅助手段。

## 5 结语

面向工程建设全过程的实时动态监控是水利工程质量发展的必然趋势。为了填补当前对坝面碾压环节质量监控的简化处理，更好地对实际筑坝的碾压施工过程进行全天候、高精度、高效益的质量监控，有必要对施工作业区的碾压车工况进行实时动态监控。UWB技术具有成本低、自组网通信、实时性强、安全性高和节能环保等优点，因此特别适用于中小型水电站建设施工中的坝面碾压质量监控。本文以山西守口堡胶凝砂砾石坝施工过程质量监控为例，采用超宽带技术对大坝填筑施工现场动态作业区振动碾压车行驶轨迹、行走速度、碾压遍数、碾压的铺层厚度变化、碾压方式等进行实时监控，提供大坝铺筑层表面的实时碾压状况等信息，为质量管理者提供准确的判别依据，从而达到施工工程质量控制的基本目标。由于超宽带技术拥有诸多优势，可以拓展到任何需要实时定位监控、振动碾压施工方式、数据要求安全和保密的应用场景中，如提防、公路铺设、建筑地基等，具有一定的研究及推广应用价值。

参 考 文 献:

- [ 1 ] 司志明, 秦根泉. 碾压混凝土重力坝设计施工技术发展与工程实例研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [ 2 ] 张秀芝, 刘志清. GPS在水布垭大坝施工质量监控中的运用[J]. 人民长江, 2006, 37(7): 65-67.
- [ 3 ] 田育功. 碾压混凝土快速筑坝技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [ 4 ] 赵春菊, 周宜红. 碾压混凝土坝施工智能仿真原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [ 5 ] 钟登华, 常昊天, 刘宁等. 高堆石坝施工过程的仿真与优化[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 863-871.
- [ 6 ] 吴晓铭. 水布垭大坝填筑碾压施工质量监控系统研究[J]. 湖北水力发电, 2002, (1): 27-28.
- [ 7 ] 赵川, 吴敏, 沈嗣元, 等. 堆石坝填筑质量 GPS 监控及附加质量法检测密度技术[J]. 云南水力发电, 2009, 25(6): 101-105.
- [ 8 ] 钟登华, 常昊天, 刘宁, 等. 高堆石坝施工过程的仿真与优化[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 863-872.

**Research and application of UWB technology in quality control of water resources project construction**

JIANG Xinlan<sup>1, 2</sup>, CHEN Yu<sup>2</sup>, MIAO Lun<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>, LUO Zhaokun<sup>3</sup>

(1. Information Network Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;  
2. Beijing Putian Tongda Technology Co., Ltd., Beijing 102218, China)

**Abstracts:** The existing achievements of water resources project construction quality monitoring control focus mainly on transport, mixing etc. However, in the process of quality control, a lot of simplified treatment on the quality control of roller compaction is carried out. To a certain extent, this situation has brought hidden dangers to the safety of the project. Ultra wideband technology has the characteristics of low cost, strong real-time performance, self-networking communication and ultra wideband frequency, especially suitable for the quality control of dam surface rolling in the construction of water projects with high real-time performance requirements. Firstly, the applicability of UWB technology in the water project construction quality control is analyzed from three aspects of real-time, safety and economy, and then its principle and base station construction principle are introduced. Finally, taking the construction quality control of the ShouKouPu CSG dam in Shanxi as an example, this paper describes the UWB base station and network layout built at the dam filling construction site, using UWB technology to realize real-time dynamic tracking and monitoring of rolling vehicle in dynamic working area, obtain the information of the key construction conditions, such as the number of rolling passes, the track and the rolling method, and provide the accurate judgment basis for the project quality management, in order to achieve the basic goal of construction quality control.

**Keywords:** UWB; water conservancy project; construction quality; CSG dam

(责任编辑: 杨虹)