

# 基于物联网的燕山水库大坝智能巡检系统

王长生<sup>1</sup>, 马福恒<sup>2</sup>, 何心望<sup>1</sup>, 俞扬峰<sup>2</sup>

(1. 河南省燕山水库管理局, 河南 叶县 467224; 2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 物联网技术的应用给现代化的大坝安全智能巡检带来了契机。针对目前水库大坝安全巡检中存在的数  
据散乱、信息孤岛严重和时效性差等诸多问题, 将智能化的物联网技术引入大坝安全巡检中, 结合传统巡检方  
法, 提出巡检物联网的信息组织方法, 以巡检指标为感知和融合对象研究了智能巡检系统架构及组成, 探讨了  
大坝安全巡检指标体系构建、巡检信息融合和作业指导书修订等系统研发的关键技术。结合河南省燕山水库  
建筑物实际研发了基于物联网的大坝智能巡检系统, 并归纳了系统主要功能。该系统的建立对提高水库安全  
管理具有重要实用价值, 值得在类似工程中应用推广。

**关键词:** 物联网; 智能巡检; 系统架构; 信息感知; 安全监测; 燕山水库

**中图分类号:** TV697

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2014)02-0048-06

作为监控和保障大坝安全运行的重要措施, 大坝安全监测包括巡视检查和仪器观测, 两者组成一个有机  
整体, 互为补充。然而, 近年来监测仪器的不断改进及自动化监测技术的迅速发展造成了一种假象, 即: 仅依  
靠监测仪器就能够全面反映大坝安全问题。事实上, 由于时空不连续性的限制, 仪器监测不可避免地存在漏  
检和盲区, 完全依靠仪器监测不一定能及时发现问题, 2013年初发生的3座水库溃坝就是巡查发现的险情。  
因此, 只有仪器监测和巡检相结合, 才能从局部到整体全面掌握大坝的运行性态。巡检包括直观检查和仪器  
探查, 其优点是不受时空限制, 能全方位地及时捕捉隐患前兆, 迅速发现问题, 是大坝安全监控不可或缺的重  
要手段。然而, 由于传统巡检的繁杂性、高强度、管理难度大和巡检人员素质良莠不齐等多种原因, 导致巡检  
存在诸多问题, 如数据组织散乱、随机性大、规范程度低、信息孤岛严重和时效性差等<sup>[1]</sup>。传统巡检方式已  
很难满足水利工程管理信息化的需要; 与此同时, 大坝安全巡检理论和方法的研究相对监测理论的研究要少  
得多, 巡检理论和方法发展缓慢, 难以实现巡检的智能化, 这也制约了巡检在大坝安全监控系统中功能的体  
现。因此, 实现大坝安全巡检的智能化和巡检信息的有效融合及安全评价研究, 不仅对于水库大坝日常维护  
管理、险情排查和应急处理具有重要意义, 也是大坝安全管理现代化发展的现实需求。本文结合河南省燕山  
水库实际研究了智能巡检系统架构及组成, 探讨了系统研发的关键技术, 研发了基于物联网的大坝智能巡检  
系统, 该系统的建立对提高水库安全管理具有重要实用价值。

## 1 系统架构

### 1.1 物联网及其体系架构

物联网(internet of things, IOT)技术将传感器技术、通信技术、分布式计算技术与现代化控制技术紧密

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079086, 51139001, 51209144); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资  
金项目(Y712005, Y713008)

作者简介: 王长生(1986-), 男, 河南方城人, 工程师, 主要从事水利工程建设与管理工。E-mail: wchsnsl@126.com  
通信作者: 马福恒(E-mail: fhma@nhri.cn)

结合,从而实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。目前,基于物联网的智能巡检系统已经在变电工区设备、铁路信号设备、桥梁、建筑和煤矿等领域得到了一定的研究和探索性的应用<sup>[2-5]</sup>,显示了物联网技术的强大生命力及其在安全巡检应用中的广阔前景。物联网的体系框架如图 1 所示,它包括感知层、网络层、应用层和公共技术<sup>[6]</sup>。感知层由各种传感器以及传感器网关构成,包括大坝监测传感器、闸门开度、RFID 标签和读写器、摄像头、GPS 等感知终端,其主要功能是识别物体,采集信息。网络层由各种私有网络、互联网、有线和无线通信网、网络管理系统和云计算平台等组成,负责传递和处理感知层获取的信息。应用层是物联网和用户的接口,实现物联网的智能应用。

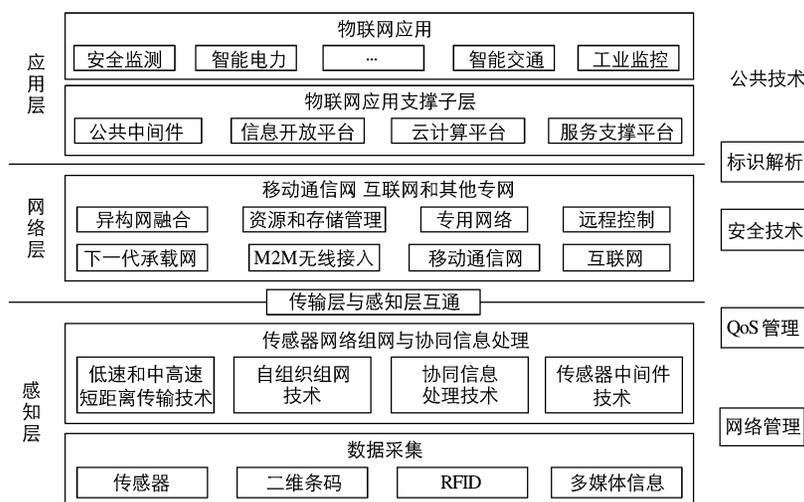


图 1 物联网体系架构

Fig. 1 Architecture of IOT

诊断水库安全性态不仅需要埋设在大坝等建筑物上的安全监测传感器信息、视频闸控信息、库区水雨情信息,而且需要下游保护区域人口分布、基础设施,以及库区水质及淤积信息。这些信息具有海量、多源、动态、异构和分散等特点,常规的信息传输和融合已不能适应水库安全管理实时性要求<sup>[7]</sup>,采用物联网进行智能管理具有重要意义。

### 1.2 智能巡检系统架构

大坝安全智能巡检系统不同于一般意义的物联网,有其显著特征,需借助坝工学、工程材料学、岩土力学、流体力学和软件工程等多领域多学科知识,融合先进仪器与测量技术、信号处理、通信技术、物联网技术、密码学、云计算和科学计算等方法和技术,在物联网的框架下,开展基于物联网和云计算的大坝安全巡检信息感知融合及动态评价模型研究,实现大坝智能巡检技术的突破与创新,将研究成果及时推广应用于实际工程,以改善当前大坝巡检技术、提升大坝安全管理和应急决策水平。系统架构见图 2,由感知层、解析层、数据层和应用层组成。

感知层主要采集安装在各建筑物的监测仪器、PDA(图像和文字)发生的事件和数据进行储存。

解析层主要利用 PDA 统一中间插件技术实现把感知到大坝等建筑物安全信息

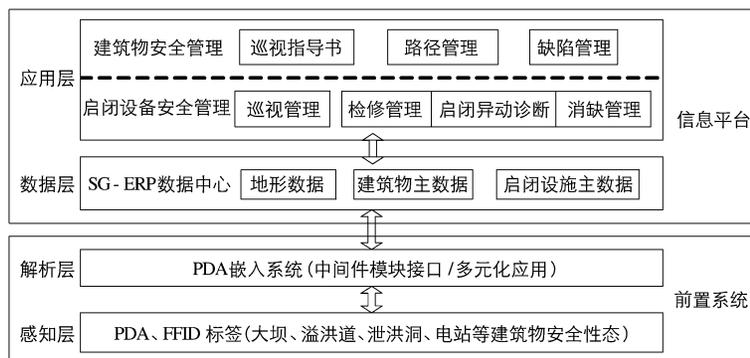


图 2 大坝智能巡检系统架构

Fig. 2 Architecture of intelligent inspection system of dam

无障碍、高可靠性、高安全性进行解析和传送,采用多元化应用模块接口,满足信息共享,实现更广泛的互连功能。

数据层主要将水库周边地形数据、大坝等建筑物体型资料、以及启闭设备资料预置于监控中心数据库,利用 PDA 安全技术将感知信息解析到 SG-ERP 数据库,或通过 PDA 加密验证后写入监控平台。

应用层主要包含应用支撑平台子系统和应用服务子系统。其中,支撑平台主要为 SG-ERP 平台,应用服务主要包括建筑物安全管理、启闭设施安全管理,以及在此基础上的寿命周期管理。如启闭设施巡视管理、检修管理、启动异常诊断、消缺管理等。

感知层和解析层作为智能巡检系统的前置部分,主要功能是感知大坝等建筑物安全信息;数据层和应用层则是将感知信息进行应用,实现建筑物及启闭设施寿命周期管理。

## 2 系统研发的关键技术

### 2.1 智能巡检指标体系构建

巡检指标体系量化是建立智能巡检系统的基础。大坝安全监测技术规范详细描述了巡检项目和巡检内容,实际工程中,由于巡检涉及多层次多指标,构建适合于信息化的指标体系较为复杂。当前巡检资料以定性分析为主,定性过程随机性较大。这就需要调查和统计国内外水库大坝失事成因,结合规范规定、坝型、等级和结构特征等多方面信息,确定坝体各区、坝基和坝区、泄水建筑、及金属结构等各单元和分部工程的包含人工感官、探测和传感检测在内的多种巡检指标,按指标、单元、分部工程和单位工程的递归型式提出水库大坝物联网巡检信息的组织方法,建立巡检多层次结构。采用多尺度理论和方法、及数量统计理论和方法研究单元局部损伤缺陷和侵蚀性环境对整体性态衰减的驱动作用,定量地提出巡检指标和整体性态的关系模型;采用逆模糊化和归一标准化等多种数学方法制定智能巡检指标体系。

根据建立的指标体系和指标属性,拟定不同巡检内容不同状态下的参数属性,分析移动智能终端的巡检定位、路线生成、指标属性识别和实时采集信息传输等功能需求,分别集成终端移动智能终端前端采集器的 RFID、传感器、处理器和 WSN 传输模块等硬件模块,及移动智能终端接收器的传感器、处理器、基于 ZigBee 的 WSN 传输模块和 LCD 屏等硬件模块;将 RFID 和巡检点三维静态信息关联,开发移动智能终端接收器的信息管理、通信模块和图形用户界面模块等,集成得到移动智能终端信息管理系统。

### 2.2 巡检作业指导书修订

每个水库规模、建筑物类别、关注要素等均不相同,如何有效地制定巡检作业指导书,以减少巡检人员工作量、提高巡检质量、快速科学地诊断工程安全性态,巡检作业指导书的修订尤为重要。这就需要建议以减少巡检工作量、交通的便利性、巡检物联网组网的科学合理性等多目标为优化约束条件,借助多目标优化智能算法实现不同巡检类型下的巡检路线的搜索识别和优化。制定切实科学的智能巡检作业指导书,在作业指导书操作中,引入了向导指南方式,使得一个缺乏经验的年轻巡检人员也可以轻松上手。对于“正常”的巡视项目,可选择“下一步”查看下一条巡视项目。否则,系统自动进入“缺陷簿”进行缺陷的添加。随着工程管理重心变化,巡检作业指导书需要维护和完善,系统中设置了维护修订功能。包括以下 3 个步骤。

(1) 巡检作业指导书修订。以水库枢纽建筑物和启闭设施安全现状、交通条件及其安全要素为主要内容,按照巡检规范要求,修订巡检作业程序标准。

(2) 巡检作业指导书审核。修订完成后的作业指导书进入电子审批流程,指导书必须经过主管部门审核、批准通过后可以执行。

(3) 巡检作业指导书导出、打印。系统支持将作业指导书导出 Word 格式,同时支持作业指导书的打印。

### 2.3 巡检信息感知和融合

由于大坝智能巡检信息的多样性、随机性、复杂性,目前的信息融合处理过程中信息的一致性以及融合感知系统的容错性和稳健性等关键技术亟待解决。为此,首先针对大坝安全多源信息的随机性、模糊性、盲性等特征进行研究,建立信息融合层、特征融合层、决策融合层的 3 层梯度结构的多源信息融合框架体系。

在此基础上,对多源信息进行功能辨识、数据清洗、数据分离,采用改进的融合算法对数据进行融合,确定多源信息度量函数、有效数据提取准则,建立大坝安全多源信息最优特征融合模型,保证融合处理过程中信息的一致性。研究统计决策理论、专家系统、SD 证据推理、自适应决策,人工神经网络和模糊推理等理论和方法,选择最优决策方法,建立智能决策感知模型,辨识大坝性态的演变规律和转异特征<sup>[8]</sup>。所采用的主要技术路线见图 3。

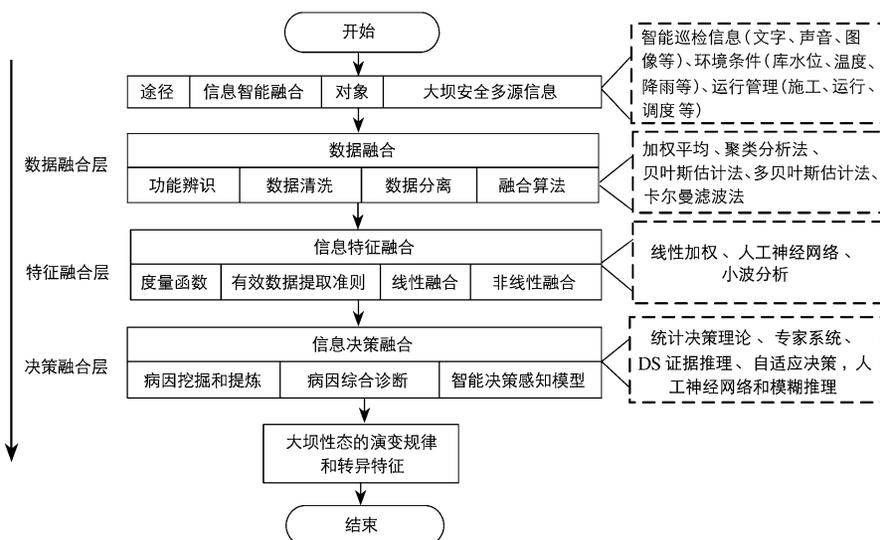


图 3 巡检信息感知和融合流程

Fig. 3 Process of checking information perception and fusion

### 3 系统实现及功能

#### 3.1 工程概况

燕山水库位于淮河流域沙颍河主要支流澧河上游干江河上,是以防洪为主,结合供水、灌溉,兼顾发电等综合利用的大(2)型水利枢纽工程。主要建筑物包括左岸台地和河槽布置的大坝、在右岸小燕山基岩区布置的泄洪洞、溢洪道、输水洞及电站<sup>[9]</sup>。大坝轴线长 4.7 km,建筑物布置分散,再加上大坝等建筑物布置较多监测仪器、视频摄像头、闸门远程控制、水雨情遥测站,给日常安全管理、巡视检查、缺陷消缺处理等带来不便。为此,河南省燕山水库管理局联合南京水利科学研究院在相关基金资助下研发了基于物联网的大坝智能巡检系统,实现了水库安全信息的及时、有效、准确的交互与处理,极大提高了水库现代化安全管理水平。

#### 3.2 系统研发

基于物联网的燕山水库大坝智能巡检系统由巡检仪(PDA)和后台管理系统组成,通过本地、远程或无线网络实现数据交换,并能与现有的后台 GIS 系统互联和信息共享。其结构拓扑图如图 4 所示。巡检仪通过本地 USB 接口或无线网络与水库信息管理服务器进行通讯,客户浏览端通过 HTTP 协议与 Web 服务器进行通讯,Web 服务器与后台数据库直接交互,最终实现巡检信息的存储和持久化。该系统于 2013 年 6 月开发调试完成,目前运行正常。

#### 3.3 系统功能

该系统极大利用了现有的通讯条件,相比用 WLAN 方式或微波等方式大大地节约了网络建设的投资,利用了更可靠、稳定的通讯网络覆盖,实现接入功能,并且具备极大

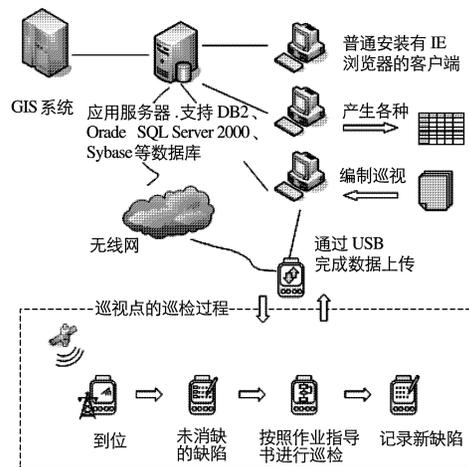


图 4 系统结构拓扑图

Fig. 4 Topology of system structure

的可扩展性<sup>[10]</sup>。其主要功能有:

(1) 根据水库建筑物实际制定《大坝巡视作业指导书》,规范巡视作业内容、步骤,并把《大坝巡视作业指导书》编制在移动终端应用中,引入了向导指南方式,使得一个缺乏经验的年轻巡检人员也可以轻松上手。

(2) 系统自动提醒本岗当日的任务。在巡视工作前,依据作业指导书,向巡检人员提供:人员要求信息、危险点分析信息、安全措施信息、巡视工器具的工作前确认。可以适应不同的作业要求,也同时尽可能降低巡视人员的作业强度。

(3) 每次巡查人员的巡查路径轨迹能实时进行保存,从而可以实时的在监控中心、分管领导的 PC 终端或移动终端上显示,同时也作为人员动态信息保存在系统中。

(4) 智能 PDA 手机终端都支持拍照(130 万像素)、录音、定位等功能;本系统提供统一直观的操作界面集成这些手机内置功能,把发生问题的事件、部件的照片、声音和地图上的标点信息一起记录下来。巡检员开始沿巡查路线进行巡查,发现破损情况后,在移动终端上记录破损情况。系统在上报数据库的同时,会将附带的事件(部件)发生的地图、照片和声音信息一起传送到分管领导的计算机和移动终端上,使问题报送和处理更为及时。

(5) 分管领导接到缺陷信息后,系统会自动提醒责任领导组织特别巡查,并自动进入消缺流程。

(6) 当巡检人员保存巡视记录时,巡检仪会在现场判断该巡检人员是否到达巡查关键点附近,若未到达,系统会发出警告信息。有效解决定位误差带来的考核不精确问题。同时系统采用了先进的 CF 接口 GPS 定位仪(由 PDA 直接供电,不用外接电源)。采用差分计量方法进行优化,定位误差一般可在 5 m 之内,保证到位率统计的正确性。

(7) 未消除缺陷和隐患的警示。在巡视过程中,当记录某一巡查关键点到位信息的时候,系统会提示该关键点是否含有以前发现的、但却未消除的缺陷。巡检人员依据其缺陷的描述和内容判断缺陷是否被消除或该缺陷有升级和降级的情况,并将依据缺陷的真实情况修改缺陷记录或对该记录进行消缺处理。

## 4 结 语

水库大坝的安全不仅直接影响着预期效益的发挥,而且关系到下游人民群众的生命财产安全乃至社会的稳定,其安全不仅需要监测仪器实时监视,巡视检查更是不可替代。物联网的出现给现代化的大坝安全智能巡检带来了契机,本文在智能巡检系统架构及组成研究的基础上,采用 RFID 电子标签技术实现了大坝智能巡检系统中的关键点或设备智能化识别、定位、跟踪、监控和信息管理;采用 GPS 技术和 GIS 平台结合监控巡视检查任务书的执行情况;采用智能手持设备接收巡检作业书,采集、记录并上报巡视检查的信息(包括巡视路线、图片、音频、视频、文字报告等);通过 3G 网络等网络传输方式与大坝智能巡检系统平台、大坝安全监测信息服务平台相结合制定全面并且有针对性的巡检方案。最后结合河南省燕山水库实际建立一个全方位跨平台的智能巡检系统,该系统的建立对提高水库安全管理具有重大推广意义。

## 参 考 文 献:

- [1] 邢林生. 略论大坝巡视检查的重要性[J]. 大坝与安全, 2005(5): 7-10. (XING Lin-sheng. Discussion on significance of perambulation inspection[J]. Large Dam and Safety, 2005(5): 7-10. (in Chinese))
- [2] 王穗平, 赵泽辉, 刘亚磊, 等. 基于巡检的高速公路桥梁安全监测与维护研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(5): 165-170. (WANG Sui-ping, ZHAO Ze-hui, LIU Ya-lei, et al. Study on safety monitoring and maintenance of highway bridges based on point to point inspection[J]. China Safety Science Journal(CSSJ), 2009, 19(5): 165-170. (in Chinese))
- [3] 谢江宏, 李雪梅. 物联网技术在变电站巡检中的应用[J]. 电力学报, 2012, 27(1): 50-53. (XIE Jiang-hong, LI Xue-mei. Application of Thing Internet in transformer substation routing inspection[J]. Journal of Electric Power, 2012, 27(1): 50-53. (in Chinese))
- [4] 陈明, 严洁云. 基于物联网技术的变电设备智能巡检系统研究[J]. 电力信息化, 2011, 9(1): 85-89. (CHEN Ming,

- YAN Jie-yun. Research on intelligent inspection system of transformation equipment based on Internet of Things technology[J]. Electric Power Information Technology, 2011, 9(1): 85-89. (in Chinese))
- [5] 王军号, 孟祥瑞. 基于物联网感知的煤矿安全监测数据级融合研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1401-1407. (WANG Jun-hao, MENG Xiang-rui. Research on the data levels fusion of mine safe monitoring based on the perception of Internet of Things[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1401-1407. (in Chinese))
- [6] 刘文博, 敬笑. 基于 PDA 的智能巡检系统的设计[J]. 电子元器件应用, 2013, 13(1): 45-47. (LIU Wen-bo, JING Xiao. Design of intelligent inspection system based on PDA[J]. Electronic Component & Device Applications, 2013, 13(1): 45-47. (in Chinese))
- [7] 黄漫国, 樊尚春, 郑德智, 等. 多传感器数据融合技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(3): 5-8. (HUANG Man-guo, FAN Shang-chun, ZHENG De-zhi, et al. Research progress of multi-sensor data fusion technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(3): 5-8. (in Chinese))
- [8] 凌云. 基于物联网的异构传感数据融合方法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 138-140. (LING Yun. Heterogeneous sensor based on content networking data fusion method research[J]. Computer Simulation, 2011, 28(11): 138-140. (in Chinese))
- [9] 马福恒, 李永江, 刘成栋. 燕山水库信息管理自动化系统集成技术[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 188-189. (MA Fu-heng, LI Yong-jiang, LIU Cheng-dong. Integrated technology in information management automation system of Yanshan Reservoir [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 188-189. (in Chinese))
- [10] 郭江, 林霖, 曹禹, 等. 基于 Web 的水电站大坝巡检系统设计与开发[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 54-56. (GUO Jiang, LIN Lin, CAO Yu, et al. Design and development of dam inspection system based on Web technique[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(7): 54-56. (in Chinese))

## Intelligent inspection system for Yanshan reservoir dam based on the internet of things technology

WANG Chang-sheng<sup>1</sup>, MA Fu-heng<sup>2</sup>, HE Xin-wang<sup>1</sup>, YU Yang-feng<sup>2</sup>

(1. Yanshan Reservoir Management Bureau of Henan Province, Yexian 467224, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The application of the internet of things technology (IOT) brings opportunity for modern dam safety intelligent inspection. Aiming at the present situation of reservoir dam safety inspection data, information island serious deficiencies and poor timeliness problem, this paper introduces intelligent internet of things technology in the dam safety inspection, combined with traditional inspection methods, and puts forward the method to check the internet information organization and inspection index as an object to carry out studies of the perception and fusion architecture and composition of the intelligent inspection system, and probes into the construction index system of dam safety inspection, information fusion and revision work instructions, etc. and the key technology of system development. An intelligent inspection system is developed based on the internet of things and the main function of the system in combination with Yanshan reservoir dam works is summarized. The establishment of the system is of significant and practical value for improving the reservoir safety management. And the system is well worthy of application and promotion in the similar reservoir dam works.

**Key words:** internet of things; intelligent inspection; system framework; information perception; safety inspection; Yanshan reservoir