

基于监测传感器的新型智能测控装备研发与应用

赵杰, 黄会宝, 李诺东, 张涵轲

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 国内外水电工程安全监测自动化测控装置多以单片机研制, 普遍存在采集速度慢、传输层级多、功能扩展受限、设备状态不详等问题, 制约了大坝安全的高效管控。基于此, 首次提出将 PLC 技术引进到大坝安全监测领域, 自主研发了基于监测传感器的新型工程安全智能测控装备, 可适应振弦式、差阻式、电容式和数字式等多类型传感器并获取变形、渗流渗压、应力应变、环境量以及设备监控等多参数物理量, 实现了传感器监测数据采集频次自适应、异常数据自预警、设备状态自诊断等多项技术突破, 有效提升了大坝安全管控能力。

关键词: 可信度测量; 频次自适应; 主动监测; 设备状态诊断; 分级预警

中图分类号: TN931.3; TP212.6; P415.1+3

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2021)04-0005-04

Research and Application of New Intelligent Measurement and Control Equipment Based on Monitoring Sensors

ZHAO Jie, HUANG Huibao, LI Nuodong, ZHANG Hanke

(1. CHN Energy Dadu River Hydropower Development Co., Ltd, Chengdu, Sichuan, 610041;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company Chengdu Power Supply Company, Chengdu, Sichuan, 610041)

Abstract: Safety monitoring automatic measurement and control devices used in hydropower engineering both in China and abroad are mostly developed by single-chip microcomputers, which generally have problems such as slow collection speed, multi-level transmission, limited expansion of function, and unknown equipment status that restrict the efficient management and control of dam safety. Based on above issues, this paper, for the first time, proposes to introduce PLC technology to the field of dam safety monitoring, and independently develops a new type of engineering safety intelligent measurement and control equipment based on monitoring sensors, which can adapt to multiple types of sensors such as vibrating wire, differential resistance, capacitive and digital sensors. With these new equipment, multi-parameter physical quantities such as deformation, seepage pressure, stress and strain, environmental factors and equipment monitoring are acquired, and multiple technological breakthroughs such as sensor monitoring data collection frequency adaptation, abnormal data self-warning, equipment state self-diagnosis, etc. are realized. Application of the new intelligent measurement and control equipment effectively improves the capability of safety control and management on dams.

Key words: reliability measurement, frequency adaptation, active monitoring, equipment status diagnosis, hierarchical warning

0 引言

水电工程是国家重大的基础设施, 其运行安全关系重大, 而大坝安全监测作为监控大坝安全的耳目, 快速、准确获取监测数据、反馈大坝安全显得尤为重要^[1]。例如: 2020 年汛期大渡河流域遭受百年一遇的大洪水, 为减轻下游及长江流域防洪压力, 大渡河利用瀑布沟等水库拦蓄洪水, 错峰削峰率达到 8 成, 而快速拦蓄洪水的背后就是一条条监测数据的作用, 依靠着监测数据实时反

馈快速蓄水过程中的大坝安全。基于此, 大渡河公司在每座大坝均布设了完备的监测仪器, 但如何利用自动化、信息化手段快速、智能取得数据、反馈工程安全, 一直是困扰大坝安全管理者的难题。从国内外看, 现有自动化数据采集设备及系统普遍存在采集速度慢、传输层级多、功能扩展受限、设备信息不详等不足, 尤其在洪水、暴雨等特殊工况时常会出现通讯中断、数据漏测等问题, 在紧急情况下, 管理人员无法准确掌握大坝或边坡的运行状况, 难以评价工程安全稳定情况。

收稿日期: 2021-06-18

1 研发新装备的总体思路

坚持问题导向,引进 PLC(可编辑控制器)技术,融合物联网、边缘计算等技术,瞄准大坝安全监测内观传感器数据采集中的采集效率、测量模式、主动监测、设备监控及风险预警 5 大核心问题开展攻关,成功研发了“基于监测传感器的新型智能测控装备”。该装备主要由感知层、测控层和应用层组成,其中核心成果主要为中间控制层,它将多类型传感器集成化管理,嵌入预警模型和评判指标,可智能自主地采集数据并识别风险,供后台人员分析、评价和预警。

2 主要技术内容

2.1 形成大坝安全监测智能测控单元

大渡河公司针对目前国内其他测控装置在采集效率、数据处理分析效率等方面存在的弊端,利用 PLC^[2]在电力行业的成熟应用经验,充分发挥 PLC 的运行稳定,可靠性高、通讯协议标准化的特点,参考国家相关标准和规范,将 PLC 的应用扩大到大坝安全监测领域。同时引入边缘计算理念,将数据采集、分析、预警等指令传感端直接完成,大大提升处理效率,减轻云端的负荷。由于整个过程更加靠近用户,还为用户提供更快的响应,将需求在边缘端解决。

2.1.1 构建边缘计算的测值可信度评估模型

在实际测量过程中,在获得仪器的测量数据后,一个最重要的步骤就是对这些测量数据进行分析、评估,确认这些数据是否有效,无效的数据就要剔除,不能进入下一步的处理过程中。一般常用的处理方法就是首先去除粗差,然后按照一定的判定规则(比如 3σ 准则等)评估测量数据是否有效,能否表示真实的物理量,也即本次的测值是否可信,将可信度合乎测量要求的数据,送入下一步骤进行处理,以获得最终的测量结果。量化测值的可信度评判在云端还是边缘端完成,对测控系统的性能和可靠性会产生重大影响。据此,利用嵌入式系统强大的计算、存储平台,在数据源头,即数据测量模块端,进行测值的可信度计算、评估。实现了单支仪器采集数据时间仅为 0.18 s,采集效率提升 10.22 倍。

2.1.2 优化网络结构 减少传输路径 43%

目前,国内大坝安全数据采集平台大多数都是采用采集计算机(工控机)作为数据采集管理平

台,在实际使用过程中,工控机经常发生死机故障,每隔一段时间必须人工重新启动,耗费大量人力资源,影响数据采集效率。针对水电站工程监测采用的各种类型传感器,如电阻式、电感式、电容式、钢弦式以及其他形式,通过线路与智能测控装备直接相连。经过研发运用 CAN 总线技术,将常规内观自动化通讯网络七层级优化至四级,缩短网络通讯序列,减少网络通讯设备和信号转换,提高了数据采集效率和传输可靠性。

2.2 创新测量方法 提升测量精度

在实践中,大渡河公司创新优势互补的复合测量新方法,解决了数据跳动、测值不稳、传感器易坏等问题。经统计测量误差降低到规范允许值的 0.14 倍,显著提升了测量精度^[3]。

传感器的激励电压是整个测量过程的基础,主要分为高压激励和低压扫频激励两种方式。高压激励是产生一个高压激励脉冲使振弦振动,激发时电压峰值在几十至一百多伏。低压扫频激励是根据传感器的固有频率选择合适的频率段,对传感器施加几伏低电压的频率逐渐变大的扫频脉冲串信号,当激励信号频率和钢弦固有频率相近时,即可使钢弦振动。这两种激励方式各有所长,但都有不足。高压激励易使钢弦起振,但精度低,对钢弦损伤大;低压扫频激励精度高,但扫频耗时长。结合高压激励和低压扫频两种激励方式的优点,在测量模块中设置了复合测量模式。即第一次测量采用高压激励,快速使钢弦起振,以后测量采用低压扫频方式,以获得较高的精度。这样,解决了数据跳动、测值不稳、传感器易坏等问题。

2.3 建立智能自适应策略 满足应急加密监测需求

测控装备可根据 PLC 控制器设定规则对传感器单元进行自适应频次的数据采集读取,以获得读取对象完整的状态变化过程。PLC 具有强大的数据运算处理和存储功能,根据测量结果对比,可实现测量频次自适应主动监测功能。当同一测量对象本身发生较大变化时,通过评判规则,能在测控装备端自动增加或减少数据采集的频次,以获得测量对象的整个变化过程曲线及加密数据,确保能完整记录测量对象的状态变化,避免常规测控装置无法记录关键监测数据及变化情况

的弊端,主动记录本体演化过程,获得全过程监测变化曲线及数据,满足大坝在地震、洪水、暴雨等特殊情况下的应急加密监测需求。

2.4 研发智能诊断技术 提高设备可靠性

研发基于故障树理论的设备健康状态智能诊断技术^[4],实现了设备故障自诊断与预警,并按两级给出故障报警,辅助快速判断故障部位并指导定向消缺,以提高设备可靠性。

目前,国内常用的大坝安全监测系统,基于单片机开发,其功能较少,系统故障率较高,在故障发生后,需要维护人员自主判断故障部位,对使用人员要求高且耗时较长。基于 PLC+ 的理念,利用 PLC 成熟的 I/O 模块,通讯端口和可定制化软件的功能,以故障树分析作为工具,专门开发了数据采集系统健康状态智能诊断功能模块,实时监测采集系统内中央处理单元、信号处理单元、通讯单元等各单元的工作状态,并记录在册。诊断模块根据系统内各单元的实时及历史工作状态,评估系统健康状况,当出现一级故障时,立刻报警,通知使用人员,并通过系统预设处理措施自主处理。如在其他安全监测系统中出现的系统死机情况,可通过设备断电重启操作自动完成系统重启。当出现系统不能自主处理的故障,如系统检测到线路故障,将通过声光报警或者短消息方式通知维护人员,告知哪个设备哪一通道出现线路故障,精确确定故障点,极大限度方便了用户使用,显著提升了智能化管控水平^[5]。

2.5 研发多类型仪器 实现智能管控和及时预警

研发了多类型仪器通用采集装备,仪器接入容量扩增 4 倍,开发了具有 4 级风险预警功能的人机交互系统,实现多类型传感器的智能管控和及时预警。

2.5.1 集成多类型仪器采集模块

国内各厂家的测量模块其通讯协议不对外公开,且其大多采用非标协议,各厂家之间模块不能混合使用,给现场安全监测系统建设带来极大不便。针对水电站工程监测采用的各种类型传感器,如电阻式、电感式、电容式、钢弦式以及其他形式,研发了基于 PLC 控制且适应多类型传感器的采集装备,实现了多类型传感器仪器几何级扩增通道以及测值数据的精确读取,极大限度提升了大坝安全监测自适应水平,显著降低了工程安全

监测成本,达到了主流监测设备和传感器的即插即用目的。

2.5.2 开发大坝安全风险分级预警系统

监测系统采用 C/S 结构模式,软件结构采用多层结构,分别为数据访问层、业务逻辑服务器层和表现层(包括客户端应用表现层),通过对软件层次结构的抽象和组合,能够将数据访问、业务逻辑处理和用户界面展示部分进行分割和组装,使软件系统具备很好的伸缩性和灵活性,更好地适应复杂的网络环境、数据库类型和不同层次用户的特殊需求。

大渡河流域大坝安全风险按大坝总渗流量、有效应力、扬压系数及稳定系数等数等维度进行预警评判,共分为四级,从低到高依次为 IV、III、II、I 级,对于不同的预警等级按规则推送相应的预警信息和应急处置措施。当监控指标达到或超过评判规则中某一项评判指标时即发布预警信息,推送应急处置措施;当监控指标低于评判指标时将降低预警级别直至预警结束。大坝安全风险需综合大坝地质资料、监测数据、巡视检查等因素综合判断,必要时可邀请外部专家会商,逐步健全预警评判体系,优化应急处置策略,提升大坝安全风险管控能力。

3 应用案例

选取瀑布沟电站坝顶左岸观测房 6 个 MCU 模块接入测试,与南京水文自动化研究所承建的分分布式数据采集系统同步测量,覆盖了 27 支正常测量的振弦式传感器:包括 2 支多点位移计、3 支锚杆应力计、16 支渗压计、3 支土体位移计、3 支土压力计),测试成果理想。

3.1 短期稳定性测试

通过自动化系统在短时间内连续测读 15 次,由 15 次读数计算其中误差,根据中误差评价自动化系统重复读数精度及测值稳定性,其计算方法如下:

15 次读数分别为: x_1, x_2, \dots, x_{15} ;

实测数据算术平均值为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

式中 n 为 15。

对短时间内重复测试的数据,用贝塞尔公式

计算出短期重复测试中的误差。计算公式如下:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

按照《大坝安全监测系统验收规范》(GB/T 22385-2008)要求钢弦式仪器频率测值中误差 σ_x 应满足 ± 1 Hz的控制标准。对27支传感器连续测量,各测点均满足规范要求。

3.2 长期稳定性评价

在现行的规范中,对系统的可靠性可用平均无故障工作时间(MTBF)及数据缺失率(FR)来考核。

自动化数据系统可靠性评价应仅考核本次评定为正常的测点,考核时段取2019年10月1日至2020年3月31日。

3.2.1 平均无故障工作时间

平均无故障工作时间是可修复设备在相邻两次故障之间工作时间的平均值,用MTBF表示,它相当于设备的工作时间与这段时间内设备故障数之比,是设备可靠性的一个重要的定量指标。

故障定义:垂线自动化数据采集系统在一定时间内不能正常工作,造成所控制的测点测值异常或停测1周以上,称为测点发生故障。如果测点不能正常工作,但在一周内能恢复,则不计故障次数,但应计故障天数。

各测点平均无故障工作时间计算公式如下:

$$MTBF_i = \frac{t - t_i}{r_i} \times 24$$

本次考核系统平均无故障工作时间取各测点平均无故障工作时间的平均值,计算公式如下:

$$MTBF = F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MTBF_i$$

式中 t 为考核期天数; t_i 为考核期中故障天数; r_i 为考核期内第 i 个测点出现故障的次数,未发生故障取 $r_i = 1$; n 为系统中测点的总数。

平均无故障工作时间考核指标的确定:《大坝安全监测自动化技术规范》(DL/T5211-2005)要求“系统平均无故障时间(MTBF)大于6300 h”、“数据采集装置MTBF不小于6300 h”,本次系统年平均无故障时间考核指标按规范要求取6300 h。换算到本评价时间段2019年10月1日至2020年3月30日,无故障运行时间至少应满足3150 h。

接入的27支仪器,每日均能正常采集,年平均无故障工作时间均为4392 h,满足规范要求。

3.2.2 数据缺失率

数据缺失率是指未能测得的数据个数与应测得的数据个数之比,考核期和数据缺失计算原则与平均无故障工作时间相同。

测点数据缺失率计算公式如下:

$$FR_i = \frac{NF_i}{NM_i} \times 100\%$$

系统平均数据缺失率取各测点数据缺失率的平均值,计算公式如下:

$$FR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FR_i$$

式中 FR 为数据采集缺失率; NF_i 为未测得的数据个数; NM_i 为应测得的数据个数; N 为系统中测点的总数。

根据《大坝安全监测自动化技术规范》(DL/T5211-2005)有关“监测系统自动采集数据的数据缺失率应不大于3%”的要求,本次系统数据缺失率考核指标取3%。考评时间段内能满足设定1次/日的观测频次,数据缺失率为0。

3.2.3 准确性评价

采用便携式读数仪与PLC测量成果进行对比,先后开展了3次,综合考虑人工测读误差因素,当频率实测值最大较差 $|\sigma| \leq 2$ Hz时,为合格;否则,为不合格。经计算全部满足要求。

选取瀑布沟电站坝顶左岸观测房6个MCU模块接入测试,与南京水文自动化研究所承建的分布式数据采集系统同步测量,覆盖了27支正常测量的振弦式传感器:包括2支多点位移计、3支锚杆应力计、16支渗压计、3支土体位移计、3支土压力计,测试成果显示中误差、平均无故障工作时间、数据缺失率、准确性评价均满足规范要求。

4 结 语

引入边缘智能控制技术,利用可编程控制系统+特殊功能采集模块,能够适应多类型传感器,实时感知设备运行环境;通过以太网传输,实现信息多路径实时采集传输,减少并优化了网络层级,大力提升数据采集效率和传输速率;采用开放式通讯协议,实现了信息系统与现场测控装置的无缝衔接。

(下转第12页)

NFC 标签技术实现了巡检设备的智能化识别、定位、跟踪、监控和信息管理;采用智能手机终端采集、记录并上传巡检信息;通过 4G/5G 网络与企业内部无线网络传输方式与库坝安全信息综合管理系统相结合制定全面的巡检方案。大渡河公司建立的流域电站大坝数字化巡检系统,对提高水库安全管理具有重要的推广意义。

参考文献:

[1] 储兆伟,冯涛,李小伟.水电站大坝安全巡视检查系统的改进[J].大坝与安全,2016(01):32-36+41.
 [2] 郝于越.移动智能产品设计用户体验模型研究[J].设计,2018(07):37-39.
 [3] 张玉清,王志强,刘奇旭,等.近场通信技术的安全研究进展与发展趋势[J].计算机学报,2016,39(06):1190-1207.

[4] 倪红军.基于 Android 平台的移动终端 GPS 研究[J].计算机技术与发展,2012,22(05):198-201.
 [5] 张营军.基于物联网的工业设备智能巡检系统研究[J].电子测试,2017(23):69+51.

作者简介:

彭秀华(1987-),女,四川资阳人,工程师,硕士,主要从事水库大坝安全管理工作;
 吴双利(1990-),男,四川大竹人,助理工程师,本科,主要从事大坝安全监测与监控工作;
 胡瀚尹(1989-),女,四川广安人,工程师,学士,主要从事大坝安全监测工作;
 赵杰(1989-),女,四川阆中人,工程师,硕士,主要从事大坝及库区安全监测智能化研究与应用;
 罗正英(1980-),女,四川成都人,工程师,本科,主要从事水电站水库大坝安全监测及管理工作。(责任编辑:卓政昌)

(上接第 8 页)

根据现场实际应用,提升了特殊工况下的应急加密监测能力,破解了现场获取快速监控对象全过程完整监测数据的难题。同时,系统自动关联地震、洪水等信息,在洪水、地震等特殊场景下,自动启动加密监测或应急监测。快速应对了 2019 年四川宜宾、内江 5 级以上地震,及时获得监测数据并评价了大坝安全状况;2021 年汛期,大渡河梯级库坝群背后成千上万条监测数据,有力支撑了大坝拦蓄百年一遇的大洪水,为减轻下游及长江流域防洪压力做出了突出贡献。可有力推进监测行业“感知→传输→识别→分析→应用”的全方位智能管控的发展,提高大坝安全风险管理的能

参考文献:

[1] 庄正新.大坝安全监测自动化建设、运行之管见[A].中国水力发电工程学会大坝安全监测专业委员会.中国水力发电工程学会大坝安全监测专业委员会 1998 年学术年会暨中青年科技成果报告会论文集[C].中国水力发电工程学会大坝安全监测专业委员会:中国水力发电工程学会,1998:5.
 [2] 陈剑.基于 PLC 工业控制系统关键技术分析[J].山东工业

技术,2019(20):21-23.
 [3] 闵从军,周瑛,刘海滨,邱伟,令晓博,陈林.不同方法在大坝监测系统精度测试中的对比分析[A].江苏省测绘地理信息学会、江苏省遥感与地理信息系统学会、江苏省地理学会.地理信息与人工智能论坛暨江苏省测绘地理信息学会 2017 年学术年会论文集[C].江苏省测绘地理信息学会、江苏省遥感与地理信息系统学会、江苏省地理学会:《现代测绘》编辑部,2017:3.
 [4] 孙志久,朱福星,刘远财,杨鸽,卢林晶,任哲.多源信息融合的大坝安全智能诊断关键技术与系统实现[J].水电能源科学,2020,38(11):85-89.
 [5] 叶红,陆纬,陈龙,李东,周克明.大坝监测自动化系统智能化技术研究[J].水利信息化,2020(02):42-47.

作者简介:

赵杰(1989-),女,四川阆中人,硕士,工程师,主要从事大坝及库区安全监测智能化研究与应用工作;
 黄会宝(1983-),男,黑龙江尚志人,硕士,高级工程师,主要从事水电站水库大坝安全管理工作;
 李诺东(1990-),男,四川仁寿人,硕士,工程师,主要从事装备可靠性智能评估、大数据分析、高电压与绝缘技术工作;
 张涵轲(1998-),男,四川眉山人,本科,主要从事大坝及库区安全监测智能化研究与应用工作。(责任编辑:卓政昌)

国家能源集团大渡河公司入选国内首批大坝卫星遥感应用试点

日前,由国家能源局大坝安全监察中心、自然资源部国土卫星遥感应用中心、中国自然资源航空物探遥感中心组成的联合专家组,到国家能源集团大渡河流域开展水电站大坝安全卫星遥感应用试点项目现场查勘及工作交流,通过深入了解大渡河大岗山水电站及库区黄草坪变形体、枕头坝一级张村沟泥石流灾害点及瀑布沟砾石土心墙堆石坝等现状,将国家能源集团大渡河公司纳入国内首批水电大坝安全卫星遥感应用试点,与公司联合开展北斗卫星遥感技术应用。大渡河公司被纳入国内首批水电大坝安全卫星遥感应用试点,将通过不断扩展北斗卫星遥感技术应用场景,丰富大坝及库岸边坡地质灾害监测预警技术手段,进一步保障流域水电站安全稳定发电。(北极星电力网)